

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA

AUTONOMIA DE LUZ NATURAL VS TRANSMITÂNCIA LUMINOSA EM EDIFÍCIOS ENVIDRAÇADOS: ESTUDO DE CASO COM OPERAÇÃO DE CORTINAS EM PORTO ALEGRE

DAYLIGHT AUTONOMY VS VISUAL LIGHT TRANSMISSION IN
GLAZED BUILDINGS: CASE STUDY WITH SHADING
DEVICE OPERATION IN PORTO ALEGRE

Porto Alegre
Junho, 2022

Daniela Pacheco Pires

AUTONOMIA DE LUZ NATURAL VS TRANSMITÂNCIA LUMINOSA EM EDIFÍCIOS ENVIDRAÇADOS: ESTUDO DE CASO COM OPERAÇÃO DE CORTINAS EM PORTO ALEGRE

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em
Arquitetura, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura da Faculdade de
Arquitetura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Orientadora:

Profa. Dra. Betina Tschiedel Martau

Banca examinadora:

Profª. Drª. Ana Carolina Santos Pellegrini

PROPAR – UFRGS

Prof. Dr. Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Membro do Programa de serviço Voluntário do PósARQ e do PPGEC - UFSC

Prof. Dr. Mauricio Carvalho Ayres Torres

PROPAR – UFRGS

Porto Alegre, junho, 2022

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora, professora Dra. Betina Martau, por aceitar me acompanhar nessa jornada e por acreditar no meu interesse e na minha esperança de integração do meio profissional com o meio acadêmico.

À minha família, em especial à minha mãe, por toda compreensão e ajuda para que eu pudesse me dedicar a este trabalho.

RESUMO

Apesar de muitas décadas terem se passado desde o surgimento das fachadas de vidro em edifícios em altura, na década de 1940, essa ainda é uma forma de construir recorrente em todo o mundo, sendo símbolo de status e modernidade. Porém, muitos problemas relacionados ao conforto ambiental podem acompanhar esses edifícios, que, mesmo após inúmeros estudos publicados na literatura sobre sua dificuldade em adequar-se a qualquer tipo de clima, seguem sendo executados. Em climas frios ou compostos, as edificações com as chamadas fachadas em pele de vidro precisam de vidros com grande proteção térmica e, em geral, apresentam valores reduzidos de transmitância luminosa (TL). A incidência da luz natural no interior dessas edificações acaba muitas vezes prejudicada, não apresentando os valores desejáveis de autonomia de iluminação natural no interior dos ambientes. Além disso, extensas áreas de vidro proporcionam em determinadas orientações excesso de incidência direta de sol nos espaços internos, o que em geral resulta no fechamento do sistema de proteção solar interno (cortinas/per-

sianas) por parte dos usuários, contribuindo ainda mais para a redução da iluminância e do contato visual com o exterior. Há na literatura estudos sobre autonomia de luz natural no interior dos edifícios de escritórios, porém são reduzidas as pesquisas nacionais que discutem o impacto da variação da transmitância luminosa dos vidros e o impacto de operação de cortinas nessa autonomia. Considerando esse contexto, neste estudo buscamos avaliar o impacto na autonomia de luz natural em edifícios comerciais com fachadas em pele de vidro, ao se variar a propriedade de transmitância luminosa do vidro e ao incluir a operação de fechamento do sistema de proteção solar interno pelo usuário. A metodologia para o desenvolvimento deste trabalho foi estruturada como um estudo de caso de um edifício na cidade de Porto Alegre, em que foram realizadas simulações de autonomia de luz natural de acordo com a metodologia publicada no ano de 2012 da Illuminating Engineering Society (IES), IES-LM83, com o software DIVA. A partir desses procedimentos, buscou-se identificar a profundidade limite de configuração de

ambientes a partir das aberturas capaz de atender aos critérios definidos pela IES, que são critérios de avaliação utilizados pela certificação LEED e WELL.

Os resultados demonstraram que, como esperado, a variação da propriedade de transmitância luminosa do vidro e o fechamento do sistema de proteção solar interno impactaram significativamente e de forma diferente cada orientação solar. O estudo identificou dificuldade de atendimento do requisito definido como preferível pela IES na linguagem arquitetônica avaliada quando considerada a presença de obstruções e a importância da consideração de operação de cortinas e da análise do impacto das diferentes transmitâncias luminosas de vidro nas avaliações de luz natural.

Palavras-chave: Iluminação natural. Autonomia de Luz Natural. Transmitância Luminosa de vidros. Fachadas envidraçadas. Edifícios comerciais. Operação de cortinas.

ABSTRACT

Although many decades have passed since the emergence of glass facades in high-rise buildings in the 1940s, this is still a recurring way of building around the world, being a symbol of status and modernity. However, many problems related to environmental comfort can accompany these buildings, which, even after numerous studies published in the literature on their difficulty in adapting to any type of climate, continue to be executed. In cold or composite climates, buildings with so-called glass skin facades need glass with good thermal protection and, in general, have reduced values of visual light transmission (VLT). The incidence of daylighting inside these buildings is often impaired, not presenting the desirable values of daylight autonomy inside the environments. In addition, extensive areas of glass provide, in certain orientations, an excess of direct sunlight in internal spaces, which in general results in the closing of the internal glare control device (curtains/blinds) by the users, contributing even more to reduced lighting and visual contact with the outside. There are studies in the literature about dayli-

ght in office buildings, but there are few national researches that discuss the impact of the variation of the visual light transmission of the glass, and the impact of the operation of the glare control device in the results. Considering this context, in this study we seek to evaluate the impact on the autonomy of natural light in commercial buildings with glass skin facades, by varying the visual light transmission property of the glass and by including the operation of the interior glare control device. The methodology for the development of this work was structured as a case study of a building in the city of Porto Alegre, in which simulations of daylight autonomy were performed according to the methodology published in 2012 by the Illuminating Engineering Society (IES), IES-LM83, with DIVA software. From these procedures, we sought to identify the limit depth for setting environments from the openings capable of meeting the criteria defined by the IES, which is the evaluation criteria used by LEED and WELL certification.

Keywords: Daylight. Daylight Autonomy. Visual Light Transmission. Glazed facades. Commercial buildings. Shading device.

Lista de Figuras

Figura 1	Localização e número de edifícios com certificação LEED no mundo	21	Figura 10	Exemplo de plantas baixas de um ambiente com os resultados das avaliações de $DA_{(300)}$ à esquerda, e $ASE_{(1000,250)}$ à direita, em cores	42
Figura 2	Imagem de edifícios comerciais com certificação LEED na cidade de Porto Alegre	23	Figura 11	Resultados das avaliações de luz natural no escritório de referência Boston	44
Figura 3	Carta solar da cidade de Porto Alegre e de Macapá	32	Figura 12	Ilustração do requisito por pavimento da opção 2	50
Figura 4	Azimute e Altura Solar	33	Figura 13	Ilustração do requisito por pavimento da opção 3	51
Figura 5	Mapa do Brasil com a identificação do zoneamento bioclimático brasileiro e da cidade de Porto Alegre	34	Figura 14	Edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro	61
Figura 6	Carta solar da cidade de Porto Alegre	35	Figura 15	Imagem dos cinco edifícios com maior pontuação na Certificação LEED BD+C, CS 2009 no Brasil	62
Figura 7	Ilustração das características dos materiais	37	Figura 16	Imagem dos cinco edifícios com maior pontuação na Certificação LEED BD+C, CS no mundo	63
Figura 8	Exemplo de planta baixa de um ambiente com o resultado da avaliação de $DA_{(300)}$	39	Figura 17	Exemplo de edifícios com a linguagem arquitetônica de caixa de vidro da cidade de Porto Alegre	65
Figura 9	Exemplo de plantas baixas de um ambiente com os resultados de avaliações de UDI em cores para diferentes intervalos de iluminância	40	Figura 18	Exemplos de formas arquitetônicas	69

Figura 19	Ilustração dos afastamentos em relação à divisa	72	Figura 27	Vista superior perspectivada do terreno do estudo de caso (indicado em branco) com o entorno imediato (indicado em cinza)	82
Figura 20	Desenho explicativo do critério	74	Figura 28	Diferentes posições da quadra e da edificação de estudo, em vermelho, em relação à orientação solar	83
Figura 21	Corte esquemático demonstrando os requisitos para classificação de pavimentos isolados entre si de acordo com o Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre.	76	Figura 29	Imagem da projeção da edificação de estudo no lote, em vermelho, e da sua relação com a quadra definida pelas ruas Campos Sales e Anita Garibaldi	84
Figura 22	Mapa com a identificação da quadra de estudo	79	Figura 30	Terreno e projeção do pavimento tipo no lote	84
Figura 23	Google maps com a identificação da quadra e a marcação do terreno em estudo	79	Figura 31	Vista esquemática dos modelos Inferior e Superior de estudo com o entorno mais próximo e as respectivas alturas	85
Figura 24	Vista das edificações situadas na Avenida Carlos Gomes em Porto Alegre - RS com indicação do terreno selecionado para o estudo de caso	80	Figura 32	Corte esquemático dos modelos Inferior e Superior de estudo com as alturas consideradas	86
Figura 25	Vista da relação de altura (m) das edificações na quadra da Avenida Carlos Gomes em Porto Alegre com destaque para a volumetria de estudo (tracejado)	81	Figura 33	Corte dos modelos de estudo (Inferior e Superior)	87
Figura 26	Vista frontal e aérea do edifício a ser implantado no terreno selecionado para o estudo de caso	81	Figura 34	Perspectiva do modelo geométrico (em vermelho) e o entorno considerado (em cinza)	89
			Figura 35	Identificação dos grupos de pontos para resposta na operação de cortinas do programa	90

Figura 36	Matriz de análise	91
Figura 37	Planta baixa do pavimento tipo com os dois eixos de avaliação, em vermelho, e a indicação das obstruções	93
Figura 38	Corte com a identificação das obstruções 1 e 2 e do cenário sem obstrução.	94
Figura 39	Planta baixa do pavimento tipo com indicação dos pontos selecionados para avaliação de $DA_{(300)}$	95
Figura 40	Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ do pavimento tipo superior para as orientações solares das quadras e os vidros avaliados, com indicação da recomendação da IES em vermelho	98
Figura 41	Imagens da planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 1 da quadra	100
Figura 42	Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 2 da quadra	101

Figura 43	Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 3 da quadra	102
Figura 44	Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 4 da quadra	103
Figura 45	Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ do pavimento tipo inferior para as orientações solares das quadras e vidros avaliados, com indicação da recomendação da IES em vermelho	104
Figura 46	Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 1 da quadra	105
Figura 47	Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 2 da quadra	106
Figura 48	Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 3 da quadra	107

Figura 49	Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 4 da quadra	108	Figura 55	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada norte do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	125
Figura 50	Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ para a área total do pavimento tipo inferior e do pavimento tipo superior do modelo de estudo de acordo com a TL do vidro e com a orientação solar de quadra, com indicação da recomendação da IES em vermelho	109	Figura 56	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada sul do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	126
Figura 51	Orientação norte: resultados de $DA_{(300)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	112	Figura 57	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada leste do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	127
Figura 52	Orientação sul: resultados de $DA_{(300)}$ para diferentes TL de vidro e condições de entorno para os pontos de avaliação, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	113	Figura 58	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada oeste do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	128
Figura 53	Orientação leste: resultados de $DA_{(300,50\%)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	114	Figura 59	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada norte do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	133
Figura 54	Orientação oeste: resultados de $DA_{(300,50\%)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	115	Figura 60	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada norte para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 88%	134

Figura 61	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada norte para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 30%	135	Figura 66	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada leste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 88%	141
Figura 62	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada sul do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	136	Figura 67	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada leste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 30%	141
Figura 63	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada sul para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 88%	137	Figura 68	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada oeste do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	143
Figura 64	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada sul para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 30%	138	Figura 69	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada oeste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 88%	144
Figura 65	Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada leste do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo	139	Figura 70	Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada oeste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação - TL 30%	145

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplos de custos de vidros laminados (4 mm + 4 mm) disponíveis no mercado brasileiro em 2021 e suas propriedades com identificação em vermelho dos vidros com espectro seletivo	38	Tabela 7 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro sem a presença de obstrução frontal	130
Tabela 2 - Características dos projetos e dos vidros dos edifícios certificados LEED na cidade de Porto Alegre	49	Tabela 8 - Maiores resultados de $DA_{(1000)}$ para, pelo menos, cinco pontos de análise por grupo de controle para o cenário sem obstrução	132
Tabela 3 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1	116	Tabela 9 - Maiores resultados de $DA_{(1000)}$ para, pelo menos, cinco pontos de análise por grupo de controle	147
Tabela 5 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1	118	Tabela 10 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro com a presença da obstrução frontal 1	149
Tabela 6 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2	119	Tabela 11 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro com a presença da obstrução frontal 2	150

Tabela 12 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1 **151**

Tabela 13 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1 **152**

Tabela 14 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2 **153**

Tabela 15 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2 **154**

Tabela 16 - Resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo superior (sem a presença de obstruções) **171**

Tabela 17 - Resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo inferior com a presença da obstrução 1 **173**

Tabela 18 - Resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo inferior com a presença da obstrução 2 **174**

Lista de Quadros

Quadro 1 - Requisitos para atendimento dos critérios de iluminação natural da certificação LEED - opção 1, presentes na categoria de Qualidade do Ambiente Interno **46**

Quadro 2 - Categorias da certificação LEED v4, com destaque em negrito para as pontuações relacionadas à categoria Energia e Atmosfera **47**

Quadro 3 - Requisitos da otimização 1 de luz natural da certificação WELL **53**

Quadro 4 - Requisitos da otimização 2, parte 1, de luz natural da certificação WELL **54**

Quadro 5 - Categorias da certificação WELL v2 **55**

Quadro 6 - Parâmetros do software Radiance e valores comumente considerados para simulações de iluminação natural **59**

Quadro 7 - Características dos modelos de estudo (Inferior e Superior) **87**

Quadro 8 - Variáveis selecionadas, quantidades e valores considerados **92**

Lista de abreviaturas e siglas¹

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas	DA	Daylight autonomy - Autonomia de Luz Natural (% de horas do ano)
AHS	Ângulo Horizontal de Sombreamento	DF	Daylight factor – Fator de Luz do Dia (%)
ASE	Annual Sun Exposure - Exposição Anual ao Sol	DGP	Daylight Glare Probability – Probabilidade de Ofuscamento da Luz Natural
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers – Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado	EML	Equivalent Melanopic Lux - Lux Melanópico Equivalente
AVS	Ângulo Vertical de Sombreamento	GBC	Green Building Council – Conselho de Construções Sustentáveis
CBDM	Climate Based Daylight Modelling – Modelagem de luz do dia baseada no clima	IA	Índice de Aproveitamento
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage - Comissão Internacional de Iluminação	IES	Illuminating Engineering Society – Sociedade de Engenharia de Iluminação

¹ As siglas que não são nacionais serão utilizadas nesse trabalho em inglês, pois o seu uso foi consagrado na língua inglesa, tanto no meio internacional quanto nacional.

IWBI International WELL Building Institute - Instituto Internacional de Construção WELL

LEED Leadership in Energy and Environmental Design – Liderança em Energia e Design Ambiental

PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

sDA Spatial Daylight Autonomy - Autonomia Espacial de Luz Natural

TL Transmitância Luminosa

TO Taxa de Ocupação

UDI Useful Daylight Illuminance – Iluminância Natural Útil (% de horas do ano)

UGR Unified Glare Rating - Índice de Ofuscamento Unificado

USGBC U.S. Green Building Council – Conselho Norte-americano de Construções Sustentáveis

TCC Temperatura Correlata de Cor

WWR Window-to-wall Ratio – Relação janela/parede

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01

Introdução

21

1.1 ILUMINAÇÃO E EDIFÍCIOS COM PELE DE VIDRO	24
1.2 OBJETIVOS	29
1.3 DELIMITAÇÕES DO ESTUDO	29
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	30

CAPÍTULO 02

Iluminação natural no contexto da arquitetura: características, métricas e ferramentas de projeto

32

2.1 CARACTERÍSTICAS DO CLIMA DE PORTO ALEGRE	33
2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS TRANSLÚCIDOS	35
2.3 MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA LUZ NATURAL	39

2.4 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL NA CERTIFICAÇÃO LEED (V4) E WELL(V2).....	44
2.5. ELEMENTOS DE PROTEÇÃO SOLAR INTERNOS E COMPORTAMENTO DE OPERAÇÃO DO USUÁRIO.....	55
2.6 IMPACTO DO ENTORNO E DA ORIENTAÇÃO SOLAR NA AUTONOMIA DA ILUMINAÇÃO NATURAL.....	57
2.7. FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO DA LUZ NATURAL.....	58
2.8 EDIFÍCIOS COMERCIAIS DE VIDRO E A ILUMINAÇÃO.....	60
2.8.1 ILUMINAÇÃO NATURAL E VOLUMETRIA DO EDIFÍCIO.....	67
2.8.2 ILUMINAÇÃO E PROFUNDIDADE DOS AMBIENTES.....	69
2.9 REGULAMENTAÇÕES DA CIDADE DE PORTO ALEGRE E SUA RELAÇÃO COM A ILUMINAÇÃO.....	71

CAPÍTULO 03

Metodologia

78

3.1 ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL E MODELO DE ESTUDO.....	78
3.1.1 PARÂMETROS DO MODELO DE ESTUDO.....	82
3.2 ETAPA 2: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSMITÂNCIA LUMINOSA (TL) DOS VIDROS.....	88
3.3 ETAPA 3: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E DOS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE.....	88
3.4 ETAPA 4: SISTEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DO IMPACTO DA ORIENTAÇÃO SOLAR DA QUADRA E DO ENTORNO.....	92
3.5 ETAPA 5: SISTEMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE PROFUNDIDADE X TL DE VIDROS X ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA.....	93
3.6 ETAPA 6: SISTEMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES DO IMPACTO DA METODOLOGIA DE OPERAÇÃO DE CORTINAS NOS RESULTADOS DE sDA.....	96

CAPÍTULO 04

Resultados e Discussão

98

4.1 | ANÁLISE DE SDA_(300,50%) PARA AS DIFERENTES ORIENTAÇÕES DE QUADRA E IMPACTO DO ENTORNO 98

4.2 | ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DO AMBIENTE, TRANSMITÂNCIA LUMINOSA DO VIDRO E ENTORNO PARA AS ORIENTAÇÕES SOLARES AVALIADAS.....110

4.3 | CONSIDERAÇÕES SOBRE O ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DA CERTIFICAÇÃO LEED V4.1 E WEEL V2.....121

4.4 | ANÁLISE SOBRE O IMPACTO DA METODOLOGIA DE OPERAÇÃO DE CORTINAS NOS RESULTADOS DE DA_(300,50%) 124

4.4.1 | PAVIMENTO TIPO SUPERIOR SEM INFLUÊNCIA DE OBSTRUÇÕES..... 124

4.4.2 | PAVIMENTO TIPO INFERIOR: INFLUÊNCIA DAS OBSTRUÇÕES FRONTAIS 1 E 2..... 132

CAPÍTULO 05

Conclusões

156

Referências

163

Apêndice

171

Glossário

175



CAPÍTULO 01

Introdução

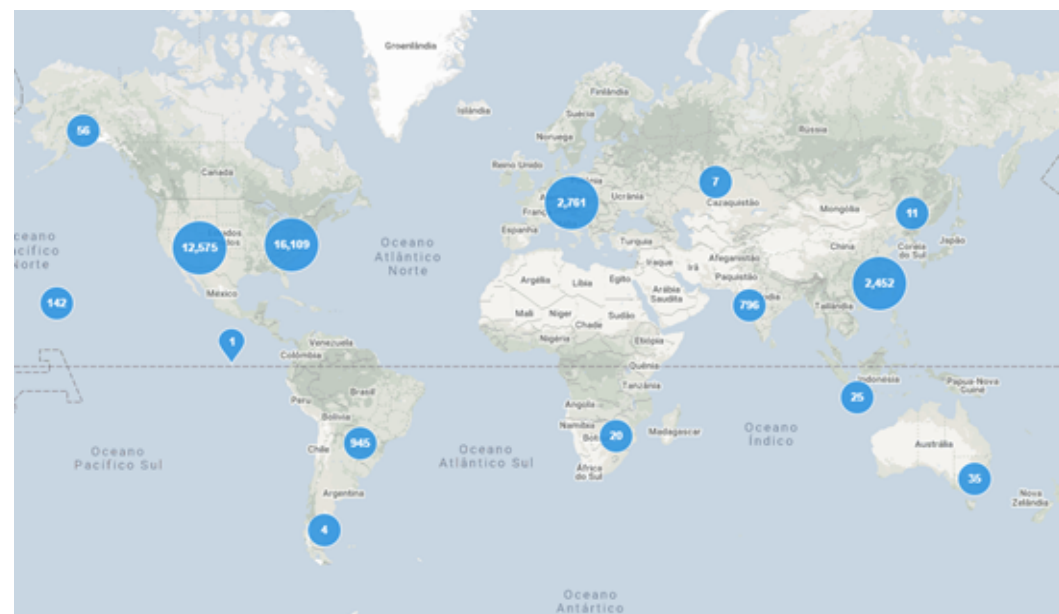
Introdução

A Crise do Petróleo na década de 1970 desencadeou uma grande preocupação com a eficiência das edificações, tendo em vista que o custo da produção de energia ficou muito elevado nos países onde a energia era produzida através da queima desse material. Com o objetivo de redução de gastos energéticos, durante a década de 1980, muitos edifícios tiveram seus sistemas de ventilação e seus níveis de iluminação reduzidos, o que comprometeu a qualidade interna dos ambientes. Em 1982, a Organização Mundial de Saúde (OMS) fez o primeiro estudo sistematizado para analisar problemas relacionados à saúde de ocupantes de edifícios, denominando essas situações de Síndrome do Edifício Doente (Sick Building Syndrome – SBS). Mais tarde, na década de 1990, foram desenvolvidos conceitos mais específicos sobre sustentabilidade e o tema qualidade do ambiente interior passou a evoluir junto com as questões de eficiência energética. Em 1993 o Conselho de Construções Sustentáveis dos Estados Unidos, U.S. Green Building Council (USGBC), desenvolveu a certificação Leadership in Energy and Environmental Design (LEED), que de acordo com o GBC Brasil

(2018), é a principal plataforma utilizada para edifícios verdes, aplicada atualmente em mais de 160 países, com mais de 51 mil edifícios certificados (Figura 1). Ela chegou ao Brasil em 2007 e a procura por selos verdes coloca o país em quarto lugar no ranking mundial da certificação LEED, de acordo com o Green Building Council Brasil - GBC (GBC BRASIL, 2018).

Figura 1

Localização e número de edifícios com certificação LEED no mundo



Fonte: GBIG, 2021a.

Em 2014 foi desenvolvido o primeiro selo que busca certificar e monitorar o desempenho dos edifícios relacionado apenas com o impacto da edificação na saúde e no bem-estar dos ocupantes, o WELL Building Standard. Desenvolvida pelo International WELL Building Institute (IWBI), essa certificação considera as pessoas como o foco de todos os critérios, que são relacionados à qualidade e ao desempenho do edifício em relação aos usuários. A quantidade de projetos já registrados internacionalmente para obter a certificação WELL – quase 20 mil projetos até o ano de 2020 – demonstra o interesse crescente nesse assunto (IWBI, 2021b). No Brasil, até o ano de 2021, dois edifícios localizados na cidade de São Paulo já são certificados, e outros sessenta já estão registrados para obter a certificação (IWBI, 2021b). Essas certificações não são obrigatórias pela legislação brasileira, mas sua busca é fomentada tanto pela necessidade de colaborar com a preservação do meio ambiente, quanto pela redução de custos operacionais e melhora da imagem das empresas no mercado imobiliário.

Um estudo realizado em 2017 demonstrou que diversos edifícios de escritório com certificação ambiental, construídos na cidade de São Paulo a partir do ano 2000, não levam em consideração uma análise integrada das diversas questões que

interferem na iluminação natural. O estudo observou que as estratégias de projeto foram elaboradas sem considerar conjuntamente as questões importantes; disponibilidade de luz natural; conforto visual dos ocupantes, o comportamento dos mesmos que interfere no nível da iluminação natural ao longo do ano; e aproveitamento de luz natural visando à redução do consumo de energia (PEREIRA, 2017). Os projetos dos edifícios que buscam a certificação LEED necessitam obrigatoriamente atender a requisitos mínimos de eficiência energética, nos quais a climatização artificial, em geral, tem impacto significativo. Para o clima da cidade de Porto Alegre, uma das estratégias necessárias para o conforto térmico e o menor uso de energia elétrica no verão, é o sombreamento das aberturas e a redução de áreas envidraçadas para a orientação oeste. No inverno, é a vedação das aberturas dos ambientes mais representativos da edificação, de modo a evitar que o calor saia do seu interior (SILVA; STÜRMER, 2006). No entanto, os edifícios que possuem certificação LEED na cidade não apresentam essas características (Figura 2).

Figura 2

Imagem de edifícios comerciais com certificação LEED na cidade de Porto Alegre



Fonte: Site da Construtora Tedesco ² (foto à esquerda); site da Incorporadora Belmondo ³ (foto central); site da Construtora Pavei ⁴ (foto à direita).

² <http://tedesco.com.br/2017/08/02/mr-shan-business-offices-bird-fundo-imobiliario/>

³ <http://www.belmondo.com.br/jbz/galeria>

⁴ <https://www.pavei.com.br/dompedro>

Edifícios com fachada toda de vidro localizados em cidades com altas latitudes e com climas predominantemente frios podem criar um problema para a eficiência energética. Esses locais exigem tecnologias de envidraçamento avançadas, isto é, com valores de transmitância térmica (Fator U) baixos (BELTRAN; LIU, 2020). Portanto, edifícios com fachada completamente envidraçada em cidades com o perfil climático de Porto Alegre, para atenderem critérios de conforto térmico e de eficiência energética, necessitam da especificação de vidros com grande proteção térmica o que pode impactar a entrada de luz natural no interior dos ambientes uma vez que esses vidros apresentam valores de transmitância luminosa inferiores aos valores dos vidros sem proteção térmica, que apresenta transmitância luminosa de aproximadamente 88%.

1.1 | ILUMINAÇÃO E EDIFÍCIOS COM PELE DE VIDRO

O uso da luz do dia, além de possibilitar o desligamento e dimerização do sistema de iluminação elétrica ocasionando economia de energia, é requisito fundamental para a garantia da saúde e do bem-estar de seus ocupantes. Além de permitir a visão, ela também atua sincronizando os ritmos circadianos, que

regulam a adaptação do ser humano ao meio ambiente. Para o organismo humano funcionar corretamente, é necessário estar exposto à luz (ciclo claro) durante o dia e à escuridão (ciclo escuro) à noite. Essa característica da relação entre o homem e a iluminação requer um esforço multidisciplinar para determinar as doses saudáveis de exposição e demanda que os sistemas e os projetistas considerem esses efeitos (TONELLO, 2015). Muitas empresas já perceberam a importância do investimento em edificações cujas características arquitetônicas dão suporte ao bem-estar dos funcionários visando ao aumento da produtividade. Elas estimulam, assim, a criatividade das equipes, além de reduzirem as faltas de trabalho ocasionadas por motivo de doença. A empresa Coldwell Banker Richard Ellis, CBRE, em Los Angeles nos Estados Unidos, realizou uma pesquisa com seus trabalhadores, a qual foi publicada em um relatório em 2014. Eles observaram que, após a implementação de medidas objetivando maior cuidado com a saúde e o bem-estar dos funcionários, 79% deles informaram sentir-se mais produtivos, enquanto 93% afirmaram que o ambiente teve impacto positivo no seu desempenho no trabalho (BEAUDOIN, 2020).

Considerando o tema eficiência energética e qualidade do ambiente interno em edifícios comerciais, é preciso aten-

ção em relação ao desempenho da iluminação natural, pois, na revisão da literatura, encontramos vários estudos que apontaram baixo desempenho de iluminação natural no interior dos ambientes avaliados (PEREIRA, 2017; PIRES; MARTAU, 2019; TURAN et al., 2019). Apesar de muitos edifícios de pele de vidro possuírem selos de certificações ambientais por atenderem padrões desejáveis de eficiência energética e conforto térmico, eles nem sempre são satisfatórios em termos de conforto luminoso. Constata-se pelos estudos analisados que essa certificação é atingida por meio da utilização de vidros com melhores propriedades de proteção térmica, porém sabe-se que esse tipo de vidro pode impactar negativamente a autonomia de luz natural do edifício. Outro aspecto relevante a ser incluído nessa problemática é a utilização de cortinas e/ou persianas por parte dos usuários em busca de proteção solar ou de redução do ofuscamento, o que influencia significativamente os resultados de autonomia de luz natural no ambiente, principalmente em edificações com fachadas envidraçadas.

Aspectos qualitativos da presença da iluminação natural no interior das edificações passaram a ser mais bem avaliados após a introdução, no ano de 2000, do conceito de Modelagem de Luz do Dia com Base no Clima (Climate-Based Daylight

Modeling – CBDM) (MARDALJEVIC, 2000; REINHART; HERKEL, 2000). Em 2012, a Sociedade de Engenharia de Iluminação (Illuminating Engineering Society - IES) publicou seu método de cálculo para a avaliação da luz natural no interior dos espaços, o qual avalia a presença de luz natural anual nos ambientes, levando em consideração o comportamento do usuário na operação do sistema de proteção interna – cortina ou persiana. Esse método definido pela IES (IES-LM83-12) foi introduzido em 2014 como critério de avaliação dos edifícios que buscam a certificação LEED ou o selo WELL Building Standard (USGBC, 2018; IWBI, 2015). Essa metodologia, aprovada pela IES, considera o fechamento do sistema de proteção interno que reduz a luminância oriunda das janelas ao aplicar um fator de redução na Transmissão Luminosa dos elementos translúcidos quando detectada a presença de incidência direta do sol no espaço. Logo, ambientes sem proteção externa com grande incidência direta de sol, em geral, apresentam valores menores de autonomia de luz natural, uma vez que o sistema de proteção interna permanece fechado por um maior período do tempo. Essa avaliação é fundamental, pois garantir apenas a presença de luz natural, além de não assegurar qualidade, não assegura um ambiente com presença de luz natural na prática, pois esse espaço pode precisar permanecer um grande período do dia com o sistema de

proteção solar interno (cortinas e/ou persianas) fechado devido ao excesso de incidência direta de sol. Deste modo, avaliações de autonomia de luz natural no interior dos ambientes que consideram a operação de cortinas e persianas são relevantes. Sem esse tipo de análise, simulações podem não refletir a realidade futura.

Em um estudo-piloto, analisamos três edifícios comerciais, únicos com certificação LEED para novas construções (LEED BD+C, CS) até 2021 em Porto Alegre, inaugurados em 2016, 2018 e 2020, para avaliar a iluminação natural de acordo com o método de cálculo definido pela IES. Os resultados demonstraram que, apesar de possuírem grande área de abertura ($WWR^5 > 60\%$) em função de todas as fachadas serem de vidro, apenas um dos edifícios analisados alcançou a autonomia de luz natural definida pela IES como aceitável, apresentando uma área de atendimento do requisito de apenas 1% acima do limite referenciado (PIRES; MARTAU, 2019).

Estratégias arquitetônicas de iluminação natural e não apenas tecnológicas são fundamentais para o conforto visual e para a eficiência energética no interior dos edifícios. Essas estratégias estão relacionadas à configuração geométrica do

edifício e à sua massa construída. Estratégias tecnológicas, por sua vez, são aquelas que enfatizam a especificação de sistemas e os componentes complementares, como sombreamentos e especificação das propriedades dos vidros de bom desempenho energético e conforto (GUZOWSKI, 2010). Para garantir o desempenho otimizado, é essencial que sejam consideradas as preocupações com sustentabilidade desde as primeiras etapas do desenvolvimento do projeto (DU et al., 2019). Com isso, faz-se necessário um entendimento do comportamento da luz natural no interior dos ambientes, considerando vidros de diferentes propriedades e a operação do sistema de cortinas e/ou persianas pelos usuários, pois ele influencia a autonomia de luz natural do interior dos ambientes.

A certificação LEED apresenta requisitos relacionados à categoria de eficiência energética que totalizam 33 pontos contra apenas 16 pontos na categoria de qualidade do ambiente interno. A análise dos dados fornecidos sobre edifícios certifi-

⁵ WWR (Window-to-wall ratio) = Área de abertura em relação à área de fachada do ambiente

dados disponíveis no site Green Building Information Gateway - GBIG (2021b) permite concluir que os edifícios com certificação LEED BD+C CS no Brasil atendem mais aos critérios pertencentes à categoria de eficiência energética quando comparados com os critérios de qualidade do ambiente interno. De acordo com as informações disponíveis no site, a média de atendimento de requisitos da categoria de eficiência energética é de 22 pontos (2/3 da pontuação disponível), enquanto a média de atendimento na categoria de qualidade do ambiente interno é de apenas 5 pontos (1/3 da pontuação disponível). Não é preciso lembrar que é imprescindível que os edifícios atendam a critérios mínimos de iluminação natural e não só a critérios de eficiência energética. Todavia, o que se pode constatar pelo estudo-piloto e pela revisão da literatura é que existem edifícios que possuem a certificação ambiental LEED, no entanto não atendem aos critérios mínimos estabelecidos pela IES de qualidade da iluminação natural, devido à supervalorização do desempenho energético que a estrutura dessa certificação gera. No bairro de Manhattan, em Nova York, Estados Unidos, uma pesquisa que buscou quantificar o valor atribuído pelos usuários à presença de iluminação natural em edifícios de escritórios avaliou o aproveitamento de luz natural e identificou que 74% dos prédios apresentavam pouca disponibilidade de luz natural.

Apenas um quarto dos escritórios avaliados alcançou a área de, pelo menos, 55% do ambiente com autonomia de luz natural, limite este mencionado como aceitável pela IES e utilizado como critério de avaliação da certificação LEED V.4 e WELL V2. A pesquisa considerou uma amostra de 5.154 espaços de escritórios localizados em 905 edifícios e avaliou os resultados de autonomia de luz natural de acordo com a metodologia do IES-LM-83 (TURAN et al., 2019).

Existem muitos estudos que avaliam a autonomia de luz natural no interior dos ambientes, entretanto há poucas pesquisas nacionais que analisam diferentes valores de transmitância luminosa de vidros e a sua relação com a autonomia da iluminação. Nesse contexto de produção arquitetônica, surge a pergunta deste estudo:

Em que grau o aproveitamento de luz natural nos espaços internos de edifícios comerciais com fachadas totalmente envidraçadas está sendo comprometido pela busca de eficiência energética baseada no controle térmico?

Nesse sentido, é importante identificar a profundidade máxima de ambientes relacionando-a às diferentes proprieda-

des dos vidros, além de introduzir o impacto da operação de cortinas e/ou persianas na autonomia da iluminação natural, considerando-se o contexto climático da cidade de Porto Alegre.

Para garantir um melhor desempenho de uma edificação, é essencial levar em consideração as preocupações com sustentabilidade desde as primeiras etapas do desenvolvimento do projeto (BRAGANÇA; VIEIRA; ANDRADE, 2014). Portanto, os resultados deste estudo podem ser um importante modo de auxiliar os projetistas a estabelecerem corretamente as premissas iniciais da obra e a entenderem a importância da definição das propriedades dos vidros na fase inicial do desenvolvimento do conceito arquitetônico, pois essas características podem influenciar a configuração da volumetria arquitetônica.

A avaliação quantitativa da iluminação natural, embora potencialmente mais precisa, requer programas computacionais especializados bem como conhecimento para operá-los, o que não é uma atividade comum nas práticas de arquitetura, envolvendo provavelmente consultores externos (TSAGRAS-SOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015). Com isso, estudos que demonstram o comportamento da luz considerando diversas

variáveis são importantes, pois, se compreendidos de modo prático pelos arquitetos, podem auxiliá-los nas decisões projetuais. A presença de luz natural no interior dos ambientes está diretamente relacionada às características espaciais dos edifícios e não somente à definição de sua envoltória. Por isso, o impacto das estratégias de projeto relacionadas à volumetria precisa ser facilmente entendido pelos projetistas a fim de que sejam definidas diretrizes de projeto que possam auxiliar os arquitetos no início do desenvolvimento de projetos. Além disso, o entendimento do comportamento da luz no interior dos ambientes precisa ser compreendido de acordo com diferentes transmitâncias luminosas de vidro e com o número de horas de incidência direta de sol gerado em cada orientação solar, pois essas variáveis influenciam a autonomia de luz natural do edifício. Pensar a luz de forma integrada ao conceito arquitetônico permite, então, que esses objetivos sejam alcançados de forma mais eficaz.

Com isso, este estudo visa auxiliar no desenvolvimento de projetos e em decisões projetuais mais adequadas ao clima local, considerando as características de vidros com alta proteção térmica que são necessários para o clima da cidade de Porto Alegre em edifícios com grande área de vidro a fim de propor-

cionar eficiência energética e conforto térmico. A produção de uma arquitetura sustentável não é uma escolha, mas sim uma condição básica da boa arquitetura principalmente no cenário do aquecimento global em curso no século XXI. O mercado imobiliário precisa avançar na consciência desses critérios, garantindo e testando o que é disponibilizado à cidade.

1.2 | OBJETIVOS

O presente trabalho visa avaliar o impacto de diferentes valores de transmitância luminosa de vidros e da operação de cortinas e/ou persianas pelos usuários, de acordo com a metodologia da IES, na variável autonomia espacial de luz natural, em diferentes orientações solares.

Os objetivos secundários deste estudo são:

- identificar a profundidade limite necessária do ambiente de acordo com a orientação solar para atendimento dos critérios internacionais de qualidade de iluminação natural definidos pela IES;

- avaliar a influência da orientação solar na autonomia de luz natural;
- avaliar o impacto da operação ou não de cortinas e persianas na autonomia de luz natural, conforme metodologia indicada pela IES.

1.3 | DELIMITAÇÕES DO ESTUDO

O presente estudo não abordará o impacto das dimensões das aberturas, uma vez que o objeto do estudo são edifícios com fachadas de vidro na área total. Também não serão avaliadas variações de altura de pé-direito e de refletância dos revestimentos internos. Além disso, não serão incluídos aspectos relacionados ao desempenho acústico dos vidros, apesar de este ser um aspecto relevante para o conforto nas edificações.

1.4 | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos e dividido em quatro partes. A primeira parte é a *Introdução*, na qual são apresentados aspectos relevantes do contexto de pesquisa, salientando os objetivos e a delimitação do estudo. A segunda parte é formada pelo capítulo dois, *Iluminação natural no contexto da arquitetura: características, métricas e ferramentas de projeto*, que compreende a revisão da literatura existente sobre os principais conceitos relacionados à iluminação natural e a edifícios de escritórios. A terceira parte do trabalho aborda o método de pesquisa, com a apresentação das suas diferentes etapas e, por fim, a quarta parte do trabalho é composta por um capítulo de análise e discussão dos resultados e por um capítulo de conclusão do estudo.



CAPÍTULO 02

Iluminação natural no contexto da arquitetura:
características, métricas e ferramentas de
projeto

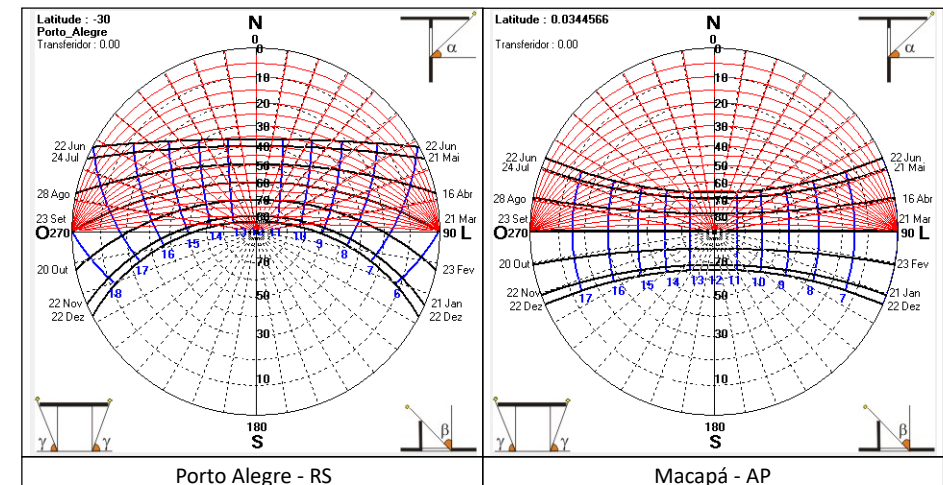
Iluminação natural no contexto da arquitetura: características, métricas e ferramentas de projeto

A orientação geográfica influencia significativamente os resultados de aproveitamento de luz natural de um ambiente. Segundo Reinhart (2018), dependendo do clima local, até 85% da radiação solar anual que chega às superfícies horizontais é oriunda da luz direta do sol e, à medida que a latitude aumenta, no hemisfério sul, a diferença entre a duração do dia entre o inverno e o verão aumenta, sendo essa uma variável importante para a autonomia de luz natural no interior dos ambientes. A radiação horizontal anual tende a reduzir à medida que aumenta a latitude do local. Isso ocorre porque os raios solares percorrem distâncias maiores através da atmosfera terrestre conforme se afastam do Equador, permitindo que maior fração da radiação solar seja absorvida e/ou espalhada pelos gases da atmosfera. A figura 3 apresenta a carta solar da cidade de Porto Alegre - RS, latitude -30.0277° , e da cidade de Macapá - AP, capital

brasileira mais próxima da linha do Equador, Latitude 0.0344566° , de modo a demonstrando a diferença entre as trajetórias solares de acordo com as diferentes latitudes. As cartas solares são representações gráficas do percurso aparente do sol na abóboda celeste ao longo do dia em diferentes épocas do ano.

Figura 3

Carta solar da cidade de Porto Alegre e de Macapá

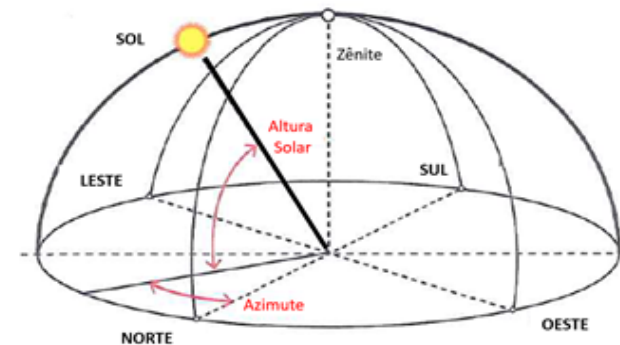


Fonte: ANALYSIS SOL-AR (2009).

A radiação solar que alcança um determinado local é chamada de radiação direta, e a radiação que é espalhada é chamada de radiação difusa, sendo a proporção entre esses valores um aspecto importante para estimar a qualidade da iluminação natural em uma região. Outra razão para os níveis de radiação solar anual diminuírem à proporção que aumenta a distância em relação ao Equador é que a altura solar apresenta valores mais baixos e com isso atinge uma superfície horizontal com um ângulo menor (REINHART,2014). Para desenvolver projetos que barrem a incidência direta do sol, assim como para buscar um melhor aproveitamento de luz natural, é fundamental o conhecimento da posição solar e do movimento solar. Dois ângulos comuns usados nesse caso são a altitude e o azimute (Figura 4). Altura solar é o ângulo entre o sol e o plano horizontal e varia de 0, durante o nascer do sol, a 90°, durante zênite. O Azimute é a distância angular entre a projeção horizontal do sol e o norte. Quando esse ângulo apresenta um perfil mais baixo, significa que a luz do sol tem mais chances de penetrar mais profundamente no espaço.

Figura 4

Azimute e Altura Solar



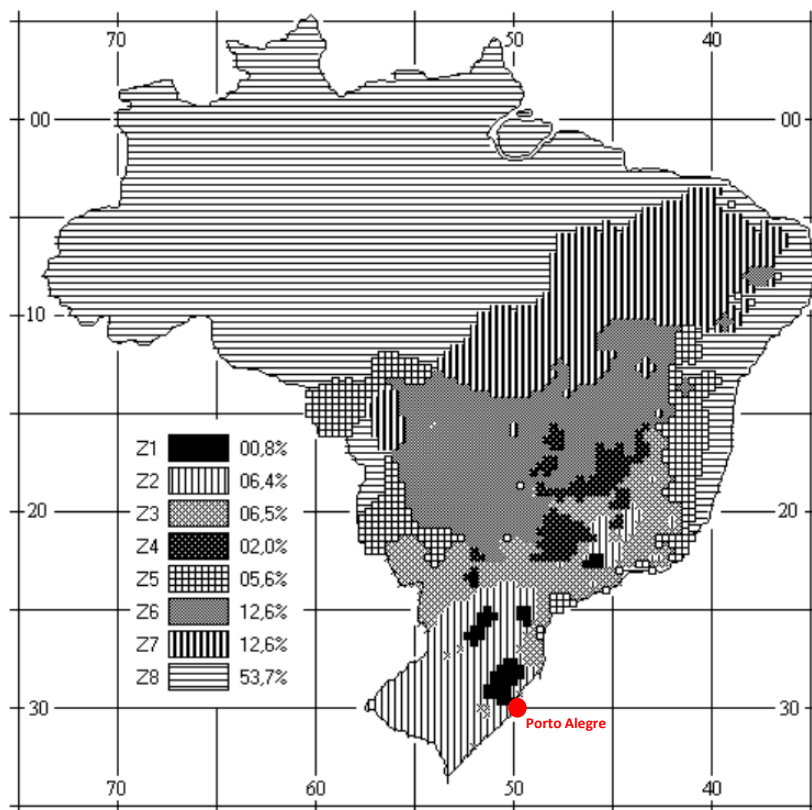
Fonte: Daylight Handbook I (adaptado).

2.1 | CARACTERÍSTICAS DO CLIMA DE PORTO ALEGRE

A cidade de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul, tem as seguintes coordenadas geográficas: latitude -30.0277°, e longitude -51.2287. Ela apresenta um clima subtropical úmido, com verões quentes e invernos frios, e uma considerável amplitude térmica. De acordo com o Zoneamento Bioclimático Brasileiro (ABNT, 2005), Porto Alegre pertence à zona bioclimática 2 (Figura 5).

Figura 5

Mapa do Brasil com a identificação do zoneamento bioclimático brasileiro e da cidade de Porto Alegre



Fonte: ABNT (2005).

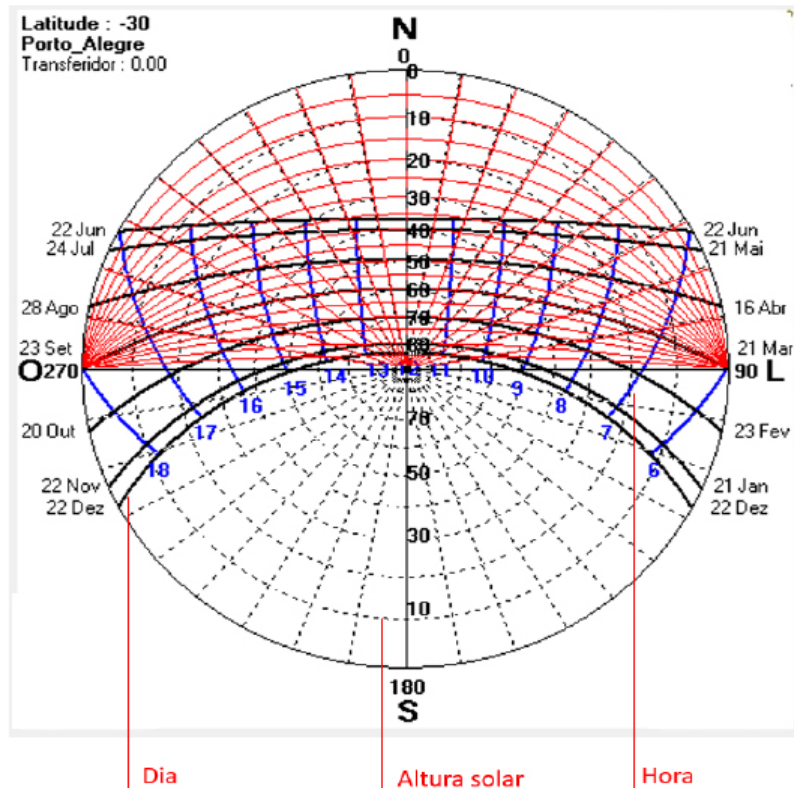
As estratégias de projeto para a cidade de Porto Alegre necessárias para o conforto e para o menor uso de energia no verão são o sombreamento das aberturas e a redução de áreas envidraçadas para a orientação oeste e, no inverno, é a vedação das aberturas dos ambientes, de modo a evitar que o calor escoe do interior das edificações para o exterior (SILVA; STÜR-MER, 2006).

De acordo com o percurso aparente do sol na abóboda celeste ao longo do dia em diferentes épocas do ano na cidade de Porto Alegre, é possível observar que fachadas direcionadas para o sul praticamente não recebem incidência direta de sol, existindo a penetração apenas no início e no final do dia no período do verão. Fachadas direcionadas para o norte recebem incidência direta de sol no outono, na primavera e no inverno, sendo a incidência no período do verão bem reduzida (compreendida apenas no período próximo ao meio-dia). Por fim, as fachadas leste e oeste recebem incidência direta de sol durante toda manhã e tarde, respectivamente. É importante salientar que, devido ao fato de o período de uso de edifícios de escritórios ser normalmente compreendido entre as 8 h e as 18 h, a incidência direta de sol em ambientes direcionados para o leste

é superior em relação a ambientes direcionados para o oeste (Figura 6).

Figura 6

Carta solar da cidade de Porto Alegre



Fonte: Programa ANALYSIS SOL-AR (2009).

2.2 | PROPRIEDADES DOS MATERIAIS TRANSLÚCIDOS

As características dos materiais impactam o aproveitamento da luz natural no interior dos ambientes. As superfícies são responsáveis e podem ser moldadas para concentrar, refletir e/ou redistribuir a luz natural no interior dos ambientes. Estratégias simples, como a definição de cores de parede, forro e piso, afetam a distribuição de luz natural no interior do edifício. Os materiais podem ser translúcidos, que permitem a passagem de luz, ou opacos, que barram a passagem da luz. Os materiais translúcidos apresentam as seguintes propriedades, dependendo de seu comportamento em relação a passagem da luz:

a) Transmitância Luminosa (TL): é a fração da luz incidente que passa por um material. Pode envolver todos os comprimentos de ondas visíveis ou ser determinada em função do comprimento de onda, sendo denominada, nesse caso, Transmitância Espectral. Os valores de classificação variam de 0 a 1, sendo que os materiais opacos apresentam TL igual a 0.

b) Refletância (ρ): é a fração de luz incidente que retorna pela superfície. Pode envolver todos os comprimentos de ondas vi-

síveis ou ser determinada em função do comprimento de onda, sendo denominada, nesse caso, Refletância Espectral. A Refletância é afetada pela geometria, pelo comprimento de onda e pela polarização do fluxo luminoso incidente. Os valores de classificação variam de 0 a 1. É normalmente classificada em dois tipos: Especular e Difusa. A Refletância Especular ocorre quando o material apresenta irregularidades que são menores quando comparadas com o comprimento de onda incidente. O ângulo entre o raio refletido e a reta normal é igual ao ângulo formado pelo raio incidente e a normal. A Refletância Difusa ocorre quando a superfície apresenta irregularidades maiores quando comparadas com o comprimento de onda incidente. Nesse caso, os raios refletidos apresentam uma emissão uniforme em todas as direções. .

c) Absortância Luminosa (α): é a fração do fluxo luminoso absorvido pela espessura de um material. Os valores de classificação variam de 0 a 1.

Os materiais apresentam comportamentos similares relacionados com a radiação térmica, ou seja, a radiação que chega a um material é transmitida, refletida ou absorvida, sendo o total dessas parcelas igual a 100% da radiação incidente (Figura

7). A radiação térmica é transmitida para o interior de um ambiente por intermédio dos elementos translúcidos e é absorvida e refletida pelos elementos translúcidos e opacos. A radiação térmica absorvida por um material conduz o calor para o interior do ambiente. Existem dois termos muito utilizados que descrevem características dos materiais translúcidos: o **Fator Solar**, em inglês reconhecido pela sigla SHGC (*Solar Heat Gain Coefficient*), que está relacionado com os ganhos de calor solar por radiação (inclui o calor radiante transmitido pelo vidro e a radiação solar absorvida, que é re-irradiada ou transmitida, por condução ou convecção, ao ambiente) sendo uma característica crítica em edificações de climas quentes; e o **Fator U**, do inglês *U Factor*, que está relacionado com a transmitância térmica que acontece após a absorção, sendo está uma variável de importante análise para climas frios.

Figura 7

Ilustração das características dos materiais

LUZ

TL – Transmitância Luminosa

Indica a fração de luz (espectro visível) que é transmitida por um elemento translúcido.

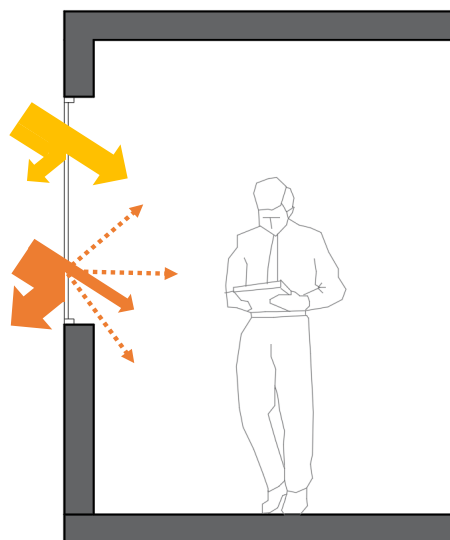
Calor

FS – Fator Solar

Indica a fração de ganhos de calor solar por radiação de um elemento translúcido.

Fator U

Indica a capacidade de um material de conduzir o calor após ele ter absorvido.
Transmitância térmica



Fonte: Elaborado pela autora.

Um vidro, quando mais apresenta a propriedade de barrar a Transmitância Solar, mais bloqueia a Transmitância Luminosa, a não ser no caso de vidros com espectro seletivo, que permi-

tem uma maior transmitância no intervalo de comprimento de onda visível. A seletividade de um material translúcido é a razão entre a Transmitância Luminosa e o Fator Solar. Um vidro, para ser considerado de espectro seletivo, necessita de um índice de seletividade maior ou igual a 1,25. Esses vidros apresentam tecnologia diferenciada e custos superiores quando comparados com vidros cujo índice é próximo ou inferior a 1, conforme pode ser observado na tabela 1. A tabela 1 apresenta exemplos de vidros comercializados no Brasil por dois grandes fornecedores. Os números demonstram valores de TL bem inferiores quando comparado com o valor de TL de vidros sem proteção térmica (88%), que são comumente utilizados em estudos de avaliações de luz natural.

Tabela 1 - Exemplos de custos de vidros laminados (4 mm + 4 mm) disponíveis no mercado brasileiro em 2021 e suas propriedades com identificação em vermelho dos vidros com espectro seletivo

Fornecedor	Linha	Modelo	TL (%)	FS (%)	Seletividade (luz/calor)	Valor do m ² em dólar – \$
A	1	1	33	43	0,77	41,00
	2	2.1	41	44	0,93	46,00
		2.2	47	39	1,21	48,00 – 49,00
	3	3	39	35	1,11	
	4	4	38	31	1,21	
	5	5	68	56	1,22	107,00
6	6	51	28	1,82		
B	1	1.1	38	42	0,90	35,00 – 44,00
	2	2.1	31	33	0,94	44,00 – 53,00
		2.2	48	45	1,07	
	3	3.1	33	34	0,97	43,00 – 62,00
		3.2	47	43	1,09	
		3.3	58	50	1,16	
	4	4.1	48	33	1,45	62,00 – 71,00
		4.2	57	37	1,54	

Fonte: Empresas Guardian Vidros e Cebrace⁹

⁹ Informações e dados de orçamentos recebidos das empresas por e-mail em março de 2021. Valor do dólar em março de 2021 = R\$ 5,63.

De acordo com o relato dos fornecedores, os vidros mais comercializados apresentam índice de seletividade mais baixa. Com isso, e tendo em vista que, para o atendimento de critérios de eficiência energética na cidade de Porto Alegre é importante a utilização de revestimentos translúcidos com baixos valores de FS, muitas vezes são adquiridos vidros com valores de TL baixos, bem inferiores aos de um vidro sem proteção térmica (TL = 88%), o que pode comprometer a iluminação natural no interior dos ambientes em prol da eficiência energética.

2.3 | MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA LUZ NATURAL

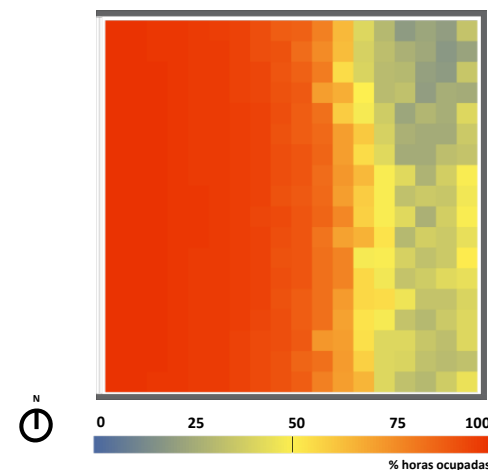
O conceito de Modelagem de Luz do Dia com Base no Clima (Climate-Based Daylight Modeling - CBDM (MARDALJEVIC, 2000; REINHART; HERKEL, 2000) são importantes pela variabilidade das condições do sol e do céu derivadas de dados meteorológicos padrão das cidades. Desde o desenvolvimento desse conceito de modelagem, diferentes métodos de simulação dinâmica, baseados em arquivos climáticos foram definidos, sendo os principais:

- Autonomia de Luz Natural - *Daylight Autonomy* (DA)

Essa métrica foi definida em 2001 por Christoph Reinhart e Oliver Walkenhorst que descreve a porcentagem das horas de ocupação anual diurnas do ambiente no qual um nível mínimo de iluminância pode ser mantido apenas pela iluminação natural. Como definição, o valor de iluminância analisado é utilizado ao lado da sigla. Ex: $DA_{(300)}$ = percentual das horas com autonomia de 300 lux (Figura 8).

Figura 8

Exemplo de planta baixa de um ambiente com o resultado da avaliação de $DA_{(300)}$



Resultados em cores de percentual de horas ocupadas com autonomia de pelo menos 300 lux.

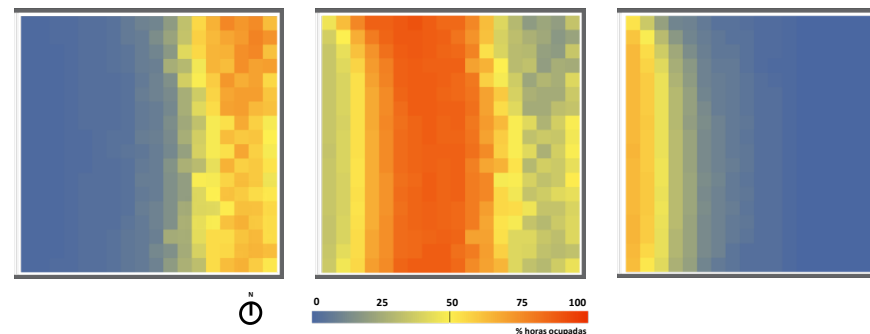
Fonte: Elaborado pela autora.

- Iluminância Natural Útil – *Useful Daylight Illuminance* (UDI)

Essa métrica foi proposta em 2005 por Mardaljevic e Nabil e descreve a porcentagem de horas de ocupação anual diurna na qual um ambiente recebe iluminâncias no plano de trabalho compreendido em um determinado intervalo. Essas faixas de iluminâncias foram posteriormente revisadas e atualmente são avaliados os intervalos compreendidos entre: 0 - 100 lux, considerado não suficiente; 100 – 300 lux, caracterizado pela possível necessidade de uso complementar de iluminação elétrica; 300 – 3000 lux, intervalo considerado com autonomia de luz natural caracterizado pela baixa probabilidade de uso adicional de iluminação elétrica e acima de 3000 lux, considerado excedido (Figura 9).

Figura 9

Exemplo de plantas baixas de um ambiente com os resultados de avaliações de UDI em cores para diferentes intervalos de iluminância



Resultados de UDI_(100-300 lux) (à esquerda); Resultados de UDI_(300-3000 lux) (centro), Resultados de UDI_(> 3000 lux) (à direita).

Fonte: Elaborado pela autora.

- Autonomia Espacial de Luz Natural - *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) e Exposição Anual ao Sol - *Annual Sun Exposure* (ASE)

Aprovada na LM-83-12 (IES, 2012), a análise de sDA demonstra o percentual de área do espaço analisado com autonomia de luz natural para uma determinada iluminância para, pelo

menos, uma fração das horas diurnas de ocupação anual do ambiente que deve ser avaliada um período diário de 10 h, 8 h até as 18 h, resultando em uma avaliação de 3650 h. Como definição, para ambientes de escritório, deve ser verificada a autonomia de 300 lux para 50% das horas ($sDA_{(300,50\%)}$). De acordo com as definições da LM-83, essa análise deve considerar o comportamento do usuário na operação do sistema de proteção interna - cortina ou persiana, de modo a bloquear a incidência direta de sol. O documento que descreve o método de avaliação menciona que é sabido que as cortinas podem ser operadas com mais ou menos frequência, mas uma padronização no método de avaliação é importante para comparação em diferentes ambiente e de que a intenção é de representar o potencial de iluminação natural que tem o ambiente, não apresentando o melhor cenário, sempre aberto, nem o pior, sempre fechado. De acordo com o método, na presença de incidência direta do sol, é aplicado um fator de redução na Transmitância Luminosa oriunda das janelas, que simula um fechamento do sistema de proteção interna.

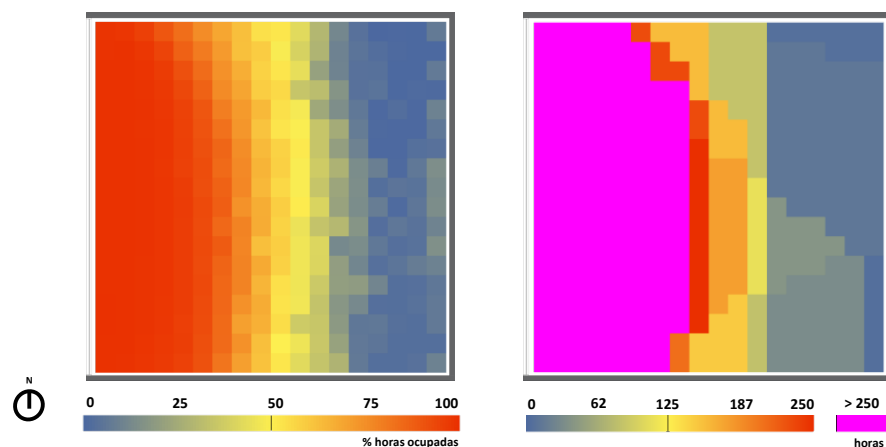
A transmitância dos cortinas e persianas idealmente pode variar de acordo com a incidência solar, no entanto, o método de cálculo menciona que uma transmitância luminosa de

20% é um valor mínimo razoável para cortinas quando desenhadas para bloquear a luz solar. Como padrão de cálculo apresentado pelo método de avaliação, esse sistema deve ser simulado fechado sempre que for detectada a presença de incidência direta de sol para, pelo menos, 2% dos pontos de um grupo de controle. Para grupos de controles pequenos, menores que 18 m², a incidência de radiação direta deve ser identificada em pelo menos mais de um ponto; para grupos de controle entre 200 m² e 499 m² a incidência de radiação direta deve ser identificada em pelo menos mais que três pontos e para grupos de controle maiores que 499 m² para pelo menos cinco pontos. Como diretriz, é definido que nenhum grupo de controle apresente área superior a 929 m², sendo mencionado a importância do separação dos grupos de controle em áreas pequenas, de modo a ter mais precisão nos resultados. A incidência direta de sol é definida nas avaliações através da presença de 1000 lux oriundos apenas de radiação direta de sol. Sem contribuição de luz refletida (simulação com parâmetro $ab=0$) e sem considerar a contribuição oriunda da luz difusa da componente do céu. O valor de 1000 lux foi escolhido ao invés de 4000 lux (que é similar a 50 W/m² (externo) comumente utilizado para indicar a presença de incidência direta de sol em análises térmicas), pois 1000 lux é um valor interno, que sofre influência da transmitância lumino-

sa do vidro e ângulos de incidência (IES-LM 83/12). Os resultados dessa avaliação são demonstrados nos mapas de $ASE_{(1000,250)}$, que indicam a área do ambiente avaliado que apresenta iluminação de 1000 lux ou mais, oriunda apenas de radiação direta para, pelo menos, 250 horas (IES, 2012) (Figura 10).

Figura 10

Exemplo de plantas baixas de um ambiente com os resultados das avaliações de $DA_{(300)}$, à esquerda, e $ASE_{(1000,250)}$, à direita, em cores



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise concomitante de sDA e ASE permite um balanço, pois o objetivo é otimizar a sDA sempre verificando os problemas que podem ser ocasionados pelo excesso de luz direta do sol, que pode ser averiguado na simulação de ASE. Esse método, LM-83-12, foi baseado em evidências e resultou de uma grande pesquisa de seis anos do comitê de iluminação natural da IES. Essa pesquisa obteve como resultado dois níveis de qualidade diferentes para $sDA_{(300,50\%)}$: 75% da área com 300 lux para pelo menos 50% do tempo de análise é considerado preferível por parte dos usuários, e 55% da área, como aceitável. Para valores de referência de ASE, são sugeridos valores menores que 3% como limite aceito, 7% como neutro e acima de 10% como insatisfatório, no entanto é mencionada a necessidade de pesquisas adicionais para definição desses valores limites (TSAGRASSOULIS; KONTADAKIS; ROETZEL, 2015). Sobre o ASE, a IESNA (2012) salienta que as pesquisas que embasaram a definição do método de avaliação de iluminação natural foram baseadas em salas e, portanto, a interpretação do parâmetro ASE em ambientes maiores, como plantas livres de escritórios, ainda é incerta.

Com a introdução desses métodos de avaliação que consideram orientação solar, clima, estação do ano e hora do

dia, tornou-se possível uma melhor avaliação da luz natural ao longo do ano. Antes dessas métricas de análise, as avaliações de luz natural eram realizadas através do método de Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor* – DF, em inglês). Esse método expressa o percentual de luz natural no interior de um ambiente comparado com a luz natural disponível externamente sob condições de céu encoberto, sem luz direta do sol. O Fator de Luz do Dia não foi historicamente desenvolvido para analisar um bom projeto de luz natural, mas para avaliar requisitos legais mínimos de luz natural no interior dos ambientes (REINHART, 2018).

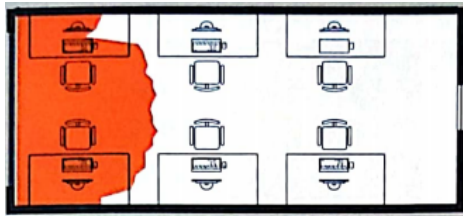
A IES menciona, na padronização desse método de análise, que as pesquisas para verificar os limites definidos como preferíveis e aceitáveis foram baseadas em estudos realizados na América do Norte entre as latitudes de 37° e 48°. É mencionado que o método pode ser aplicado além desse intervalo, no entanto é recomendado que exista um esforço para expandir a compreensão de como aplicar essas métricas mais ao norte e ao sul. Embora 300 lux seja um valor amplamente indicado para avaliação de iluminação natural de acordo com diversas recomendações, não é um parâmetro absoluto para iluminação natural. Outros intervalos de valores, como 100 lux, 200 lux, 500 lux e 1000 lux, podem ser potencialmente utilizados para anali-

sar a performance durante o período de avaliação, dependendo do uso no interior do edifício.

Uma comparação entre os critérios de avaliação de iluminação natural em um escritório de referência em Boston, de acordo com valores de recomendação de diferentes normativas, foi apresentado por Reinhart (2018). Nesse estudo foram avaliados os seguintes aspectos: (1) Fator de Luz do Dia (DF), em que foi verificado o percentual da área do ambiente que atendia a $DF > 2\%$, como requisitado pela versão 2 da certificação LEED; (2) Autonomia Espacial de Luz Natural (sDA), de acordo com os critérios de avaliação da versão 4 da certificação LEED; e (3) Iluminância Natural Útil (UDI), em que foi verificado o percentual da área do ambiente com iluminâncias entre 100 e 3000 lux. As simulações de sDA e UDI foram realizadas considerando e não considerando a operação de cortinas de acordo com a metodologia da IES-LM83 e os resultados indicaram que, excluindo-se a área próxima da janela, a profundidade de área com disponibilidade de luz natural tanto nas avaliações de $DA_{(300,50\%)}$ quanto nas de $UDI_{(100-3000 \text{ lux}, 80\%)}$ com operação de cortinas mostrou-se muito similar (Figura 11).

Figura 11

Resultados das avaliações de luz natural no escritório de referência Boston



Fator de luz natural > 2% = 28%



sDA(300, 50%)

Com operação de cortinas = 45%

Sem operação de cortinas = 51%



UDI (100-3000) 80%

C/ operação de cortinas = 27%

S/ operação de cortinas = 42%



2.4 | CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA ILUMINAÇÃO NATURAL NA CERTIFICAÇÃO LEED (V4) E WELL(V2)

A certificação LEED introduziu o método proposto pela IES como avaliação de iluminação na atualização da sua versão realizada em junho de 2014, denominada como versão 4 (V4). Essa versão da certificação pontua a edificação na avaliação de luz natural conforme as recomendações da IES, que menciona dois níveis de autonomia de luz natural: preferível quando acima de 75% da área dos ambientes com ocupação regular atenderem a métrica de avaliação, $DA_{(300,50\%)}$, e aceito quando a área de atendimento for acima de 55%. Como requisito para obter a pontuação da certificação, além de obrigatoriamente os ambientes disporem de cortinas e/ou persianas internas, nenhum ambiente deve apresentar $ASE_{(1000,250)}$ maior que 10%. No entanto, foram realizados ajustes nesses critérios em uma versão atualizada da certificação publicada em janeiro de 2018, e uma das atualizações é a redução da área de atendimento dos requisitos de iluminação natural para a edificação receber pontuação. Essa atualização, definida como versão beta (v4.1), foi comunicada como uma oportunidade de encorajar mais projetos a buscarem

Fonte: Reinhart (2018) (adaptado).

o cumprimento dos critérios tendo em vista a dificuldade de os projetos estarem atendendo aos requisitos. Então, foi introduzida a bonificação do projeto quando pelo menos 40% da área dos ambientes com ocupação regular atenderem ao critério de avaliação e a necessidade de atendimento de uma área máxima com $ASE_{(1000,250)}$ foi eliminada desde que o projeto apresente uma explicação de como vão ser resolvidas as questões relacionadas ao conforto visual dos usuários (Quadro 1).

De acordo com Beltran e Liu (2020), é possível atender aos requisitos da certificação LEED v4 em todas as latitudes e orientações. O estudo avaliou também os resultados em relação ao atendimento de ASE. O autor considera que a remoção do critério de ASE e pontuação para edificações que obtiverem o atendimento do requisito para pelo menos 40% da área de avaliação promove o uso de vidros e não incentiva os projetistas a projetar de modo a não aproveitar a luz natural nos ambientes de trabalho. Os resultados do trabalho demonstraram que as fachadas voltadas para o sul (do hemisfério superior) em locais

de latitudes baixas ($0^{\circ} - 25^{\circ}$) requerem dispositivos de sombreamento mínimo para atender às métricas sDA e ASE; latitudes intermediárias ($30^{\circ} - 50^{\circ}$) requerem dispositivos de sombreamento estendidos; e latitudes altas ($> 50^{\circ}$) requerem sombreamento profundo de modo a bloquear extensivamente o vidro da janela, sendo este último o sombreamento necessário para as fachadas voltadas para leste e oeste. No entanto, o requisito de ASE é considerado muito restritivo por diversos estudos recentes.

Quadro 1 - Requisitos para atendimento dos critérios de iluminação natural da certificação LEED - opção 1, presentes na categoria de Qualidade do Ambiente Interno

Requisitos para edifícios de escritório		Pontuação na certificação LEED de acordo com o percentual da área de piso dos ambientes regularmente ocupados do edifício com atendimento ao requisito		
		1 ponto	2 pontos	3 pontos
Versão 4 Julho de 2014	sDA (300,50%)	-	55%	75%
	ASE (1000,250)	Nenhum ambiente deve apresentar resultado maior que 10%.		
Versão 4.1 janeiro de 2018	sDA (300,50%)	40%	55%	75%
	ASE (1000,250)	O projetista deve explicar como serão resolvidos os problemas relacionados ao conforto visual.		

Fonte: USGBC, 2018 (adaptado)

Um edifício para receber a certificação LEED precisa atender a pré-requisitos mínimos, sendo obrigatórios para a conquista do selo, e o nível da certificação é definido conforme a quantidade de pontos adquiridos, podendo variar de 40 a 110 pontos, sendo o projeto definido como: Certificado, 40-49 pontos; Prata, 50-59 pontos; Ouro, 60-79 pontos; e Platina, mais de 80 pontos. A pontuação disponível está dividida em oito categorias. Existem pré-requisitos relacionados à eficiência, presentes na categoria de Energia e atmosfera, e em relação a conforto, presentes na categoria de Qualidade do ambiente interno (Quadro 2), e para obter a certificação não constam pré-requisitos relacionados especificamente à iluminação natural. O Quadro 2 apresenta as categorias e as respectivas pontuações da versão 4 da certificação, atualizada em julho de 2014, na qual é possível observar a importância da categoria “Energia e atmosfera” na pontuação.

Quadro 2 - Categorias da certificação LEED v4, com destaque em negrito para as pontuações relacionadas à categoria Energia e Atmosfera

Categorias abordadas na certificação	Pré-requisitos	Possibilidade de pontuação
Processo integrado	0	1
Localização e transporte	0	16
Terrenos sustentáveis	1	10
Eficiência no uso da água	3	11
Energia e atmosfera	4	33
Materiais e recursos	2	13
Qualidade do ambiente interno	2	16
Inovação e design	0	10

Fonte: USGBC, 2014 (adaptado)

Como é possível observar, a categoria de Energia e atmosfera apresenta impacto significativo na bonificação do edifício, sendo a classe que apresenta maiores oportunidades. Além disso, existe um pré-requisito de eficiência mínimo que o edifício deve atender para obter a certificação. Este pré-requisito para edifícios climatizados artificialmente é cobrado através da demonstração que o prédio em análise apresenta eficiência 5% superior quando comparado com um edifício-base orientado pela certificação, que segue como referência a norma americana 90.1/2010 da *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers - ASHRAE*. Esse edifício-base deve ser analisado com vidros de Fator Solar (SHGC, sigla do Inglês *Solar Heat Gain Coefficient*) de 24% e área de proporção janela/parede (*WWR – Window-to-wall ratio*) de 40%, que representa um valor baixo quando comparado a edifícios de fachadas envidraçadas construídos

atualmente. As demais cargas energéticas relacionadas ao consumo energético da edificação também são definidas de acordo com as orientações dessa norma americana, como por exemplo carga de iluminação e de equipamentos, que devem ser comparadas com as cargas do projeto. Portanto, a utilização de equipamentos eficientes e cargas de equipamentos reduzidas também afetam na eficiência do edifício, no entanto os gastos energéticos vinculados à climatização são significativos em uma edificação comercial, sendo essa a variável de grande impacto para a eficiência de um edifício comercial e que a envoltória da edificação impacta significativamente os resultados.

Para pontuação na categoria de “Energia e atmosfera” da certificação LEED, quanto mais eficiente for o projeto quando comparado com a referência, maior é a pontuação. Por conseguinte, para alcançar esses objetivos, uma alternativa é apresentar resultados pelo menos similares aos de referência, ou seja, utilizar vidros com Fator Solar e WWR similares. Além disso, quando avaliados edifícios com valores de WWR maiores, o impacto do vidro nos resultados de eficiência energética se torna ainda maior, sendo as características de proteção térmica do vidro ainda mais impactantes nos resultados. A minha experiência profissional, trabalhando por nove anos com edifícios

que buscam a certificação demonstrou que uma alternativa para a conquista de uma pontuação significativa na categoria de eficiência energética da certificação LEED para edifícios condicionados artificialmente com grande área de vidro consiste na utilização de vidros de Fator Solar próximos ao definido pela referência, ou seja, em torno de 30%. A tabela 2 apresenta as características de edifícios comerciais certificados na cidade de Porto Alegre onde pode ser observado os valores de WWR e do Fator Solar e da transmitância luminosa dos vidros utilizados.

Tabela 2 - Características dos projetos e dos vidros dos edifícios certificados LEED na cidade de Porto Alegre

Edifício	Data do término da obra	TL (%)	Fator Solar SHGC (%)	WWR
1	2016	31	33	48%
2	2018	45	39	62%
3	2020	31	33	56%

Fonte: Elaborado pela autora.

Além de a eficiência energética afetar de forma mais significativa na pontuação da certificação LEED, sendo um aspecto importante para a definição do nível da certificação do empreendimento, ela proporciona um benefício econômico para a operação do edifício que é facilmente mensurado, enquanto os benefícios relacionados à qualidade da iluminação natural no interior dos ambientes estão associados à saúde e ao bem-estar dos usuários. Com isso a eficiência energética é, na grande maioria das vezes, priorizada pelos proprietários/incorporadores.

Em relação aos critérios de avaliação da certificação *WELL Building Standard*, o programa apresenta requisito obrigatório de iluminação natural, ou seja, o projeto precisa atender um requisito mínimo para obter a certificação. O requisito obrigatório de iluminação natural da certificação WELL v2 (IWBI, 2021a), exceto para unidades habitacionais, é o atendimento de, pelo menos, uma das seguintes opções:

Opção 1: simulação computacional

Deve ser realizada de acordo com o método de cálculo do IES LM-83.

- O projeto deve apresentar pelo menos 30% da área dos ambientes regularmente ocupada com DA(200,40%) (autonomia de 200 lux para 40% do tempo), ou
- o projeto deve apresentar uma área com acesso comum irrestrito que possa acomodar pelo menos 15% dos ocupantes em qualquer momento, de forma que os usuários possam ter acesso à luz natural, se desejável. Esse espaço deve atender à DA(300,50%) (autonomia de 300 lux para 50% do tempo), para, pelo menos 75%, da área.

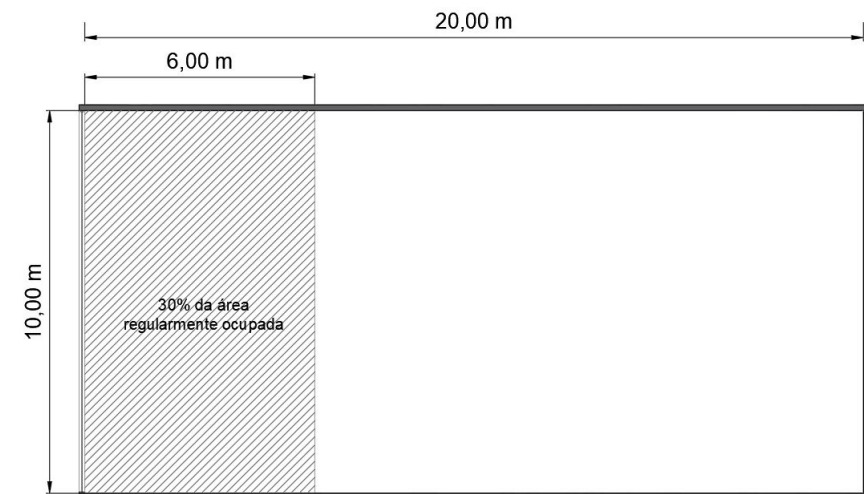
Opção 2: layout arquitetônico

- O projeto deve apresentar, pelo menos, 30% da área regularmente ocupada de cada pavimento em uma área com distância de, no mínimo, 6 m de fachadas envidraçadas (Figura 12), ou
- o projeto deve apresentar uma área com acesso comum irrestrito que possa acomodar, pelo menos, 15% dos ocupantes

do edifício em qualquer momento, se desejável. Pelo menos 70% dos assentos desses espaços devem estar localizados em área com distância de, no mínimo, 5 m de fachadas envidraçadas.

Figura 12

Ilustração do requisito por pavimento da opção 2



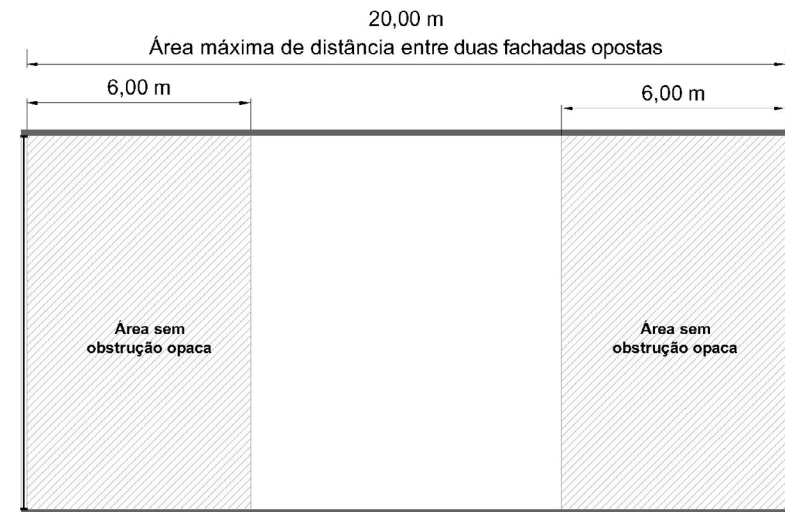
Fonte: Elaborado pela autora.

Opção 3: projeto arquitetônico

- O projeto deve apresentar área de vidro por pavimento de, pelo menos, 7% da área de piso do respectivo pavimento ou da unidade individual, ou
- o projeto não deve apresentar distância entre duas fachadas opostas envidraçadas superior a 20 m, e as áreas com distância de até 6 m dessas fachadas não devem ter obstruções opacas com altura maior que 1 m (Figura 13).

Figura 13

Ilustração do requisito por pavimento da opção 3



Fonte: Elaborado pela autora.

Opção 4: Projeto de Iluminação Circadiana¹⁰

● O projeto deve atender a, pelo menos, 1 ponto da otimização de *Projeto de Luz Circadiana* que consiste em alcançar iluminação vertical de 150 EML (Lux Melanópico Equivalente - *Equivalente Melanopic Lux*¹¹) para, pelo menos, quatro horas do dia, começando, no máximo, ao meio-dia. Esses valores devem ser avaliados em uma altura de 0,45 m acima do plano de trabalho para todas as estações de trabalho dos espaços regularmente ocupados.

Embora exista um requisito obrigatório de modo a garantir uma qualidade mínima, o requisito é de fácil atendimento, pois é possível cumpri-lo através de área mínima de aber-

tura em relação à área de piso, sendo o valor solicitado baixo (7%). Além disso, essa atualização da certificação eliminou um critério atrelado a este requisito presente na versão anterior, no qual para atendimento por área mínima de vidro era obrigatório a utilização de vidros com TL de pelo menos 40%. Além disso, o requisito obrigatório via método de simulação exige um percentual da área de atendimento dos critérios pequena (apenas 30%) da área total dos ambientes com ocupação regular da edificação. Outro aspecto importante é que a opção de atendimento através de estratégias de luz circadiana viabiliza que projetos arquitetônicos sem presença de luz natural obtenham a certificação, sendo possível o cumprimento do requisito obrigatório por meio do projeto de iluminação elétrica.

¹⁰ Projeto de iluminação circadiana: dimensionamento do sistema de iluminação com o objetivo de estimular biologicamente o sistema circadiano, além de produzir estímulo visual. A partir de 2020, o vocabulário da CIE passou a denominar esse tipo de projeto de iluminação integrativa – *integrative light*, em inglês.

¹¹EML: métrica desenvolvida por Robert J. Lucas e outros em 2014, em que é fornecida uma caixa de ferramentas que, para um espectro desejado, deriva um valor de “lux equivalente” necessário para estimular os fotorreceptores do olho humano. O EML depende da intensidade da luz, bem como da densidade de potência espectral da luz no ponto de medição. Dado um espectro de luz, cada “lux equivalente” está relacionado entre si por uma constante chamada Razão Melanópica (R). Para calcular o EML de um projeto, deve-se multiplicar o lux fotópico (L) projetado para ou medido em um edifício pela constante R: (EML = L × R) (IWBI, 2021a).

A bonificação relacionada a luz natural via método de simulação, assim como a certificação LEED, utiliza o método proposto pela IES como avaliação desde sua primeira versão-piloto de 2014. A bonificação do projeto através do método de simulação pelo atendimento dos requisitos de iluminação natural varia de acordo com as recomendações da IES em relação ao percentual mínimo das áreas avaliadas que deve atender aos requisitos (Quadro 3).

Quadro 3 - Requisitos da otimização 1 de luz natural da certificação WELL

	sDA(300,50%)	
	1 ponto	2 pontos
% de área regularmente ocupada	55%	75%

Fonte: IWBI, 2021a (adaptado).

Uma diferença quando comparado com as exigências da certificação LEED é que a certificação WELL exige que esse requisito seja atendido por pavimento, ou seja, cada pavimento individualmente precisa atender ao requisito para o edifício obter a pontuação. Além dessa opção de bonificação relacionada a luz natural, a certificação WELL apresenta outras estratégias de bonificação que permitem a conquista de até quatro pontos. Essa opção é dividida em duas partes, sendo a primeira relacionada com a distância das estações de trabalho em relação as fachadas que o projeto deve atender conforme os valores do quadro 4, para, pelo menos, 70% das estações de trabalho, desde que a TL do vidro seja de, no mínimo, 40%. A segunda parte dessa otimização está relacionada ao uso de proteções solares internas operáveis pelo usuário, que pontua o projeto com um ponto na utilização de sombreamento manual controlado pelos ocupantes e com dois pontos, se este for automático sendo fechado na presença de incidência direta de sol. Um aspecto interessante dos requisitos para o sistema de proteção interno consiste que, no caso de uso manual desse sistema, a proteção deve ser aberta pelo menos uma vez ao dia, de modo a evitar que o sistema fique fechado sem ser necessário por um período muito longo por falta de esquecimento do usuário de abrir.

Quadro 4 - Requisitos da otimização 2, parte 1, de luz natural da certificação WELL

	1 ponto	2 pontos
Distância da fachada de vidro para acomodação de, pelo menos, 70% das estações de trabalho	7,5 m	5 m

Fonte: IWBI, 2021a (adaptado).

Para obter a certificação WELL, é necessário atender a requisitos obrigatórios mínimos, assim como na certificação LEED, e mais uma pontuação mínima de 40 pontos. A quantidade de otimizações conquistadas, as quais são representadas por pontos, define o nível de certificação do projeto. São elas: Bronze, 40-49 pontos; Prata, 50-59 pontos; Ouro, 60-79 pontos; e Platina com mais de 80 pontos.

Quando analisamos os critérios que possibilitam a conquista de pontos nas certificações, a certificação LEED permite a pontuação de um ponto com $sDA_{(300,50)}$ para 40% da área de ambientes regularmente ocupados, enquanto a certificação WELL só bonifica com a fração da área que atende esse requisito de 55%. Além disso, a certificação WELL solicita o atendimento

desse percentual por pavimento da edificação e a certificação LEED, por sua vez, avalia a edificação inteira. Outro diferencial da certificação WELL, implementado na versão 2 da certificação que foi atualizada em 2020, é que para a edificação elevar o nível de certificação o projeto deve alcançar uma pontuação mínima por categoria necessariamente. Ou seja, além da conquista da pontuação necessária para definir o nível da certificação o projeto deve conquistar respectivamente pelo menos 1, 2 e 3 pontos por categoria para a obtenção no nível prata, ouro e platina.

Essa regra é importante, pois a certificação WELL apresenta uma grande possibilidades de otimização, 185 opções (Quadro 5) e com isso é evitado que o projeto apresente otimizações concentradas em algumas categorias e ficando outras prejudicadas.

Quadro 5 - Categorias da certificação WELL v2

Categorias abordadas na certificação	Pré-condições	Otimizações
Ar	4	18
Água	3	14
Nutrição	2	16
Luz	2	18
Movimento	2	21
Conforto térmico	1	16
Som	1	18
Materiais	3	18
Mente	2	19
Comunidade	4	38
Inovação	-	18

Fonte: IWBI, 2021c (adaptado)

2.5. | ELEMENTOS DE PROTEÇÃO SOLAR INTERNOS E COMPORTAMENTO DE OPERAÇÃO DO USUÁRIO

A operação dos usuários impacta claramente o aproveitamento de luz natural dos ambientes (HAZBOUN, 2018; NEZAMDOOST; MAHIC; WYMELEMBERG, 2014). Um estudo nacional (HAZBOUN, 2018) que avalia o desempenho da luz natural e considera a influência dos usuários na operação do sistema de proteção interno foi realizado em 2018. Nessa pesquisa, o comportamento dos usuários foi definido de acordo com os resultados de uma pesquisa de campo com aplicação de questionários que tinham como objetivo caracterizar esses comportamentos como ativo, passivo e intermediário. O estudo envolveu uso de escritórios na cidade de Natal – RN com fachada orientada para o leste, e os resultados de autonomia de luz natural, considerando a operação de cortinas conforme as características de usuários encontradas na pesquisa de campo, demonstraram que o modelo avaliado sem sombreamento externo (brises) apresentou o pior caso de aproveitamento da luz natural, obtendo o valor máximo de 60% quando considerado o fechamento do sistema de proteção interno por usuários de comportamento

ativo (usuários que abrem as cortinas ao entrar no ambiente, fecham na presença de desconforto visual e abrem o sistema para aproveitamento de luz natural ao longo do dia). O estudo estabeleceu, para avaliação da presença de luz natural, valores de UDI entre 500 lux e 5000 lux e envolveu apenas uma transmissão luminosa de vidro (TL = 88%).

De modo a padronizar o impacto da operação de cortinas nas avaliações de iluminação natural, o método de avaliação da IES publicado em 2012 (sDA) incluiu a operação dos elementos de proteções solares internos (cortinas/persianas) nas análises. Esse método de avaliação prescreve o acionamento de persianas quando 2% de uma malha de pontos de avaliação excede 1000 lux oriundos apenas de incidência direta de sol. Um estudo publicado em 2017 (NEZAMDOOST; MAHIC; WYMELEMBERG, 2014) que avaliou um edifício de escritório nos Estados Unidos comparou esse algoritmo de controle manual de fechamento de sistemas de proteção interno, proposto pela IES, com outros dois algoritmos: Blindswitch-2012, desenvolvido em 2012 por Van Den Wymelenberg, que ajusta o fechamento do sistema de proteção de acordo com a profundidade de penetração da luz solar e se a radiação exceder 120 W/m²; e Blindswitch-2012B, desenvolvido por Van Den Wymelenberg e

Dyke, que regula o fechamento do sistema de proteção de acordo com a iluminância vertical externa das janelas. Esse estudo avaliou a variação na operação considerando taxa média de mudança (movimento do sistema por fachada), número médio de movimentos e fechamentos, porcentagem de janelas com persianas fechadas, e variações no consumo de energia. Os resultados preliminares para o efeito de controles solares manuais em cálculos de autonomia de luz natural fornecidos pelo artigo indicaram que o método da LM-83 proporciona a maior taxa de mudança de posição do sistema de proteção, o maior número de movimentos das persianas e o menor fechamento anual médio geral em 24 horas. Esses resultados indicam que avaliações que consideram esse tipo de fechamento apresentam os maiores valores de autonomia de luz natural quando comparadas com os outros métodos analisados no estudo para análises de um mesmo período. A pesquisa apontou valores de percentual médio de fechamento do sistema de proteção interno por fachada avaliada nas orientações consideradas (norte, sul, leste e oeste). O resultado para o percentual médio de fechamento do sistema de proteção interno para a fachada sul do estudo (comportamento similar ao da fachada norte do hemisfério inferior), incorporando os algoritmos de fechamento Blindswitch-2012, Blindswitch-2012B e LM-83, foi de 19,14%, 17,13% e 12,62%,

respectivamente, quando consideradas 24 horas de operação, e de 31,12%, 27,12% e 29,72%, respectivamente, quando consideradas apenas as horas comerciais ocupadas das edificações (8 h até 18 h). É possível observar que a diferença desses valores entre os três algoritmos é menor quando considerada apenas a análise em horário comercial, que é o horário de operação característico de edifícios comerciais.

2.6 | IMPACTO DO ENTORNO E DA ORIENTAÇÃO SOLAR NA AUTONOMIA DA ILUMINAÇÃO NATURAL

Diferentes tipologias urbanas impactam o desempenho de luz natural de diferentes formas. O método de avaliação proposto pela IES, LM-83-12, define os níveis mínimos de modelagem do entorno para avaliações de iluminação natural. Nele é mencionado que devem ser consideradas edificações ou estruturas opacas distantes, pelo menos, 30 m da edificação avaliada e refletâncias de 30% para as fachadas dessas edificações e de 10% para o piso exterior. As árvores próximas ao objeto de estudo também devem constar na análise sendo modeladas

como cone, esferas ou cilindros e devem ser consideradas com refletância de 20% (IES, 2012). Um estudo realizado por Scalco e Pereira (2016) analisou o impacto da vizinhança na iluminação natural em um objeto de estudo, considerando o índice de aproveitamento (IA), as taxas de ocupação (TO), os afastamentos mínimos e as alturas limites do plano diretor vigente da cidade de Porto Alegre e escolhendo tipos de edificações para a composição da vizinhança. Os resultados demonstraram que a maior porcentagem de impactos adversos foi verificada nos cenários com parcelamento regular e ocupação da vizinhança com edificações contendo cinco pavimentos e taxa de ocupação de 75%. Os autores salientaram que, embora a verticalização das cidades seja muito criticada, os cenários avaliados nesse estudo demonstraram que edificações altas com taxa de ocupação reduzida produziram melhores condições de acesso à iluminação natural.

Laranja, Alagoas e Alvarez (2014), por sua vez, avaliaram a relação entre a geometria urbana e a orientação das aberturas na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. As análises consideraram um ambiente de 10 m² (largura de 2,60 m, profundidade de 3,85 m e pé-direito de 2,60 m) com área de abertura de 1,25 m² (1,14 m x 1,10 m), o

que representa uma proporção de 1/8 da área do piso. O ambiente foi avaliado na altura equivalente ao quarto pavimento de uma edificação e foram analisadas as iluminâncias internas de acordo com três tipos de céus, encoberto, parcialmente nublado e claro, os quais correspondem respectivamente aos valores mínimo, intermediário e máximo de iluminância. O estudo considerou um afastamento em relação à obstrução frontal de 18 m e avaliou essa obstrução com três alturas distintas: 36 m, 12 pavimentos; 45 m, 15 pavimentos; e 54 m, 18 pavimentos. A pesquisa demonstrou que, mesmo no cenário de céu encoberto, que não sofre a influência da orientação solar, os valores de iluminância foram reduzidos com o aumento da altura da edificação obstruidora. O percentual de redução de iluminância para todas as orientações nesse cenário foi de 17% com o aumento da edificação obstruidora de 36 m para 45 m, e de 12% quando essa volumetria passa de 45 m para 54 m. Já no cenário de céu parcialmente nublado, essa diminuição foi maior quando o ambiente avaliado estava direcionado para o norte, apresentando redução de 30% e de 18% respectivamente para as duas variações de obstrução frontal; e as menores reduções foram obtidas no ambiente direcionado para o sul (redução de 12% e de 8%, respectivamente). Já no cenário de céu claro, a maior redução também foi para a orientação norte, 40% e 22%

respectivamente e, não considerando a orientação sul entre as quatro orientações primárias, a que teve o menor impacto foi o ambiente direcionado para o leste, que apresentou redução de 20% e de 8%, também respectivamente para as duas variações de altura da obstrução frontal. Segundo o estudo, também foi possível concluir que, à medida que aumenta a altura da edificação obstruidora, a variação na orientação da abertura passa a ter cada vez menor influência.

2.7. | FERRAMENTAS DE SIMULAÇÃO DA LUZ NATURAL

Outro tema importante no estudo da luz natural são as ferramentas de simulação disponíveis. As análises de iluminação natural podem ser baseadas em avaliações de dias específicos, utilizando o modelo de céu de Perez para a realização dos cálculos, ou podem ser anuais, considerando dados do local. O programa Radiance, muito utilizado nessas análises, realiza cálculos anuais por meio do método de raio reverso (*ray-tracing*), em que os caminhos dos raios de luz são traçados de trás para frente, ou seja, do ponto de análise até a fonte luminosa. Os

dados de entrada para a realização da simulação de iluminação natural através dessa ferramenta são os seguintes: arquivo climático, propriedades óticas das superfícies e malha com pontos para a realização dos cálculos. O programa permite o ajuste de cinco parâmetros que determinam como serão conduzidas as simulações (Quadro 6). Os três primeiros parâmetros estão relacionados com a luz direta; e os demais, com a luz indireta. O parâmetro mais intuitivo é o *ambient bounces* - ab, que define o número de reflexões de um raio de luz que será considerado até ele ser descartado. Simulações com ab = 0 consideram apenas a iluminância oriunda da incidência direta de sol, não sendo avaliada a luz refletida internamente no ambiente. Valores de ab = 5 são suficientes para geometrias sem elementos de fachada complexos, devendo ser utilizado o valor de 8 na presença de volumetrias com elementos de fachadas mais complexos, como fachadas com um grande número de brises, de modo que um raio possa ser refletido várias vezes e sair do ambiente para ser considerado na avaliação. O Quadro 6 apresenta os valores desses parâmetros normalmente utilizados em simulações.

Quadro 6 - Parâmetros do software Radiance e valores comumente considerados para simulações de iluminação natural

Parâmetro	Significado	Valores comumente considerados
ab <i>ambient bounces</i> Inter-reflexões difusas do ambiente	Define quantas reflexões terá um raio de luz antes de ele ser eliminado.	5
ar <i>ambient resolution</i> Resolução do ambiente	Determina a densidade da interpolação dos resultados. Define como será calculada a distribuição de luminâncias.	1000
as <i>ambient super-samples</i> Amostragem do ambiente	Determina a quantidade de "raios solares" extras que serão considerados quando uma diferença significativa é encontrada entre as amostras próximas. É aplicada apenas em ambientes com divisões.	20
ad <i>ambient divisions</i> Divisão do ambiente	Determina o número de raios que serão enviados a partir de um ponto da superfície criado pela refletância do material. ad 0 = simulação sem iluminação indireta	300
aa <i>ambient accuracy</i> Precisão do ambiente	Define o percentual de erro na interpolação da iluminação indireta.	0,1

Fonte: Elaborado pela autora.

2.8 | EDIFÍCIOS COMERCIAIS DE VIDRO E A ILUMINAÇÃO

O primeiro edifício com fachada completamente envidraçada que se tornou um marco para a arquitetura mundial foi o Palácio de Cristal, projetado por Joseph Paxton em 1851 para abrigar a Exposição Universal de Londres. Após a construção desse pavilhão estruturado em ferro com 84.000 m² de vidro, o uso do vidro se popularizou principalmente durante o Modernismo, movimento iniciado na Europa, que envolvia áreas artísticas e culturais. As principais ideais modernistas chegaram no Brasil a partir da primeira década do século XX, introduzidas através de eventos como a Semana da Arte Moderna, realizada em 1922 em São Paulo.

No campo da arquitetura, Le Corbusier, considerado o pai da arquitetura moderna, postulou os cinco pontos de uma nova arquitetura: pilotis, que elevam a massa acima do solo; planta livre, obtida mediante separação entre colunas estruturais e as paredes que dividem os espaços; fachada livre, a ideia da planta livre no plano vertical; janela em fita, a longa janela corredeira horizontal; e o jardim de cobertura, que supostamente recriava o terreno coberto pela construção. Entre esses cinco

pontos postulados por Le Corbusier, dois faziam referência à independência ou à separação de estrutura e vedação, usando o material vidro como componente intercessor para alcançar os seguintes fins: a fachada livre e a janela em fita (BENTES, 2018). No Brasil, o primeiro prédio a ter uma fachada inteira de vidro foi o edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro, cuja obra foi concluída em 1945. A principal volumetria dessa edificação possuía duas fachadas inteiras de vidro – as fachadas norte e sul –, sendo a diferença entre elas a presença de uma estrutura reticular de concreto e de brises na fachada norte (Figura 14). Esse edifício, resultado do trabalho de um grupo de arquitetos liderados por Lúcio Costa, teve a participação de Le Corbusier, em 1936, como consultor para o seu desenvolvimento e é um símbolo da arquitetura moderna brasileira. Nessa época, dois acontecimentos fizeram a arquitetura moderna ser recebida como uma questão de política nacional: a revolução liderada por Getúlio Vargas em 1930 e a nomeação de Lúcio Costa como diretor da Escola de Belas Artes (FRAMPTON, 1980/2015).

Figura 14

Edifício do Ministério da Educação e Saúde no Rio de Janeiro



Fachada norte (à esquerda) e Fachada sul (à direita).

Fonte: site [archtrends](#)¹² e site [Claudejobin](#)¹³

O uso de fachadas de vidro vem crescendo desde a década de 1950 no Brasil. A literatura nacional apresenta diversos estudos a partir de simulação computacional, demonstrando os

problemas de desconforto térmico e, com isso, maiores gastos energéticos (MAIOLI, et. al, 2016; BRUGNERA et al., 2019). No entanto, é crescente a busca por essa linguagem arquitetônica inclusive entre edificações que desejam obter certificações ambientais, que são projetos que aspiram a princípios de eficiência e de sustentabilidade. A Figura 15 apresenta a imagem dos cinco edifícios comerciais brasileiros que possuem a pontuação mais alta na certificação LEED BD+C CS 2009, sendo todos da versão da certificação de 2009 (versão 3). Todos são edifícios com pele de vidro, com a exceção de um dos exemplos em que o edifício possui alguns pavimentos que não seguem esse padrão.

¹² archtrends.com/blog/palacio-gustavo-capanema

¹³ www.claudejobin.com/architect-oscar-niemeyer

Figura 15

Imagem dos cinco edifícios com maior pontuação na Certificação LEED BD+C, CS 2009 no Brasil



Imagem 1¹⁴: Ed. São Paulo Corporate Towers, São Paulo/SP, certificado em: 10/04/17; Imagem 2¹⁵: Ed. JBZ, Porto Alegre/RS, certificado em: 21/06/2019; Imagem 3¹⁶: Ed. Adalmiro Dellape Baptista, São Paulo/SP, Certificado em: 08/11/21; Imagem 4¹⁷: Ed. Vera cruz II, São Paulo/SP, certificado em 6/12/2016; Imagem 5¹⁸: Ed. Landmark Batel, Curitiba/PR, certificado em 25/09/2018.

Fonte: site dos empreendimentos.

¹⁴ www.saopaulocorporatetowers.com.br/o-empreendimento/imagens.html

¹⁵ www.belmondo.com.br/jbz/galeria

¹⁶ pages.services/mkt.cbre.com.br/B32/

¹⁷ hersil.com.br/clientes/vera-cruz-ii/

¹⁸ www.landmarkbatel.com.br

No entanto, quando é realizada essa busca no panorama internacional –seleção dos cinco edifícios com maior pontuação na certificação LEED NC CS –, é possível observar que, embora eles apresentem grande área de vidro, não são edifícios que se enquadram na linguagem arquitetônica de caixa de vidro, e pode ser identificada em alguns casos a presença de elementos de proteção solar (Figura 16). Essas cinco edificações obtiveram essa pontuação a partir da versão de 2009 da certificação.

Figura 16

Imagem dos cinco edifícios com maior pontuação na Certificação LEED BD+C, CS no mundo

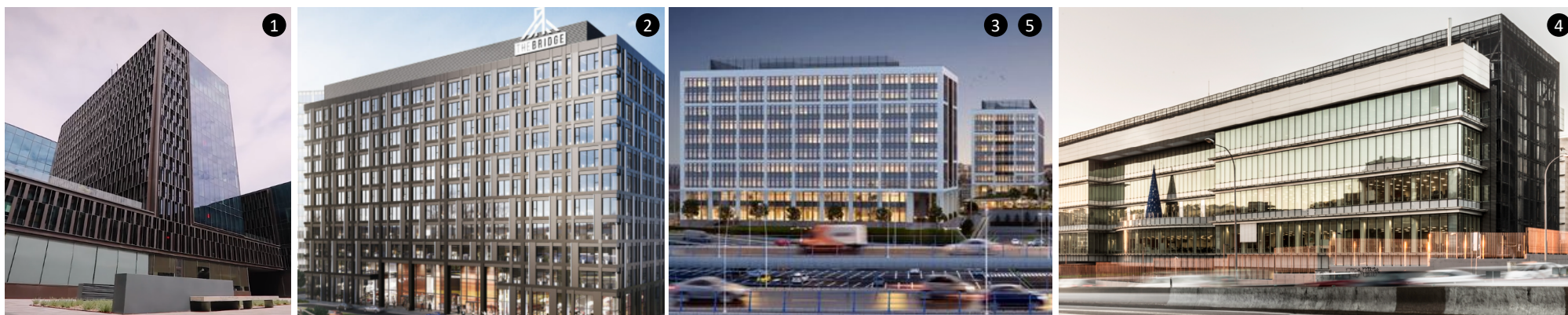


Imagem 1¹⁹: Ed. Platinum – BCN, Barcelona – ES, certificado em 24/06/2019; Imagem 2²⁰: Ed. The Bridge Buildin, nashville, TN US, certificado em 16/04/2013; Imagem 3 e 5²¹: Business Garden Bucharest Building A e C, Bucharest, Bucharest RO, certificados em 30/10/2019; Imagem 4²²: Ed. AA81 – Torre Rioja, Madrid ES, certificado em 23/06/2016.

Fonte: site dos empreendimentos

¹⁹ www.platinumbcn.com/en/about-us/

²⁰ www.epsteinglobal.com/news/the-bridge-certified-leed-cs-platinum

²¹ business-review.eu/property/offices/business-garden-bucharest-in-top-3-leed-certified-office-buildings-worldwide-206151

²² www.torrerrioja.com/en/projects/offices/edificio-aa81

Uma série de oito artigos sobre desempenho ambiental de escritórios que pertencem à linguagem arquitetônica de caixa de vidro publicada no ano de 2020 registra que:

Em 1990, ganhavam expressão as discussões sobre o desempenho ambiental e a eficiência energética dos edifícios de fachadas envidraçadas, nos cenários nacional e internacional. Hoje, trinta anos depois, a grande maioria da produção de edifícios altos de escritórios nas cidades brasileiras (assim como em muitos outros países ao redor do mundo) segue com o padrão de projeto do século passado da caixa de vidro monolítica, hermeticamente fechada e dependente dos sistemas prediais de condicionamento de ar e iluminação artificial por 100% do tempo de ocupação, em que os usuários são cada vez mais desconectados do controle das suas condições ambientais, de forma geral (GONÇALVES et. al., 2020).

Em Porto Alegre, as últimas construções e as que estão em andamento na cidade apresentam predominância dessa linguagem arquitetônica. Na Figura 17, são ilustradas algumas imagens de edifícios com fachadas envidraçadas localizados em grandes avenidas da cidade.

Figura 17

Exemplo de edifícios com a linguagem arquitetônica de caixa de vidro da cidade de Porto Alegre



Imagem 1: Ed. Trend 24, Av. 24 de Outubro; Imagem 2: Edifício Iguatemi Corporate, Av. Dr. Nilo Peçanha; Imagem 3: Ed. Trend Nova Carlos Gomes, Av. Senador Tarso Dutra e Imagem 4: Ed. Cristal Tower, Av. Diário de Notícias.

Fonte: Fotos da autora

Um estudo do ano de 2018 (BRUGNERA et al., 2018) que buscou classificar e caracterizar o desempenho energético de edifícios de escritórios de planta livre em diferentes climas brasileiros – avaliando uma cidade da zona bioclimática mais fria (Curitiba/PR – região Sul), uma da zona intermediária (São Paulo/SP – região Sudeste) e uma da zona bioclimática mais quente (Manaus/AM – região Norte) –, demonstrou que, quando alterado o sistema construtivo da fachada passando de fachada tradicional (alvenaria + janelas) para uma fachada cortina,

mesmo com a mesma área de abertura, é obtido um acréscimo no consumo do ar-condicionado de 25%. Além disso, dentre as medidas avaliadas, o percentual de abertura da fachada foi a medida que mais impactou o consumo energético, e a utilização do dispositivo de sombreamento sempre reduziu o consumo energético nas diversas situações avaliadas do estudo.

Em muitos casos, além de ser possível reduzir o consumo de ar-condicionado com o uso proteções solares externas, a utilização desses elementos pode aumentar a autonomia de luz natural nos ambientes, pois, devido à redução da entrada de incidência direta de sol, o sistema de proteção solar interno pode permanecer aberto durante um período maior do dia, aumentando a presença de luz natural. É importante que o tema de iluminação natural seja abordado em conjunto com a eficiência energética, uma vez que diferentes estratégias arquitetônicas podem até impactar de forma significativa o consumo energético da edificação, mas também podem prejudicar a qualidade da luz natural do ambiente.

A importância da luz natural e a sua relação com a saúde e o bem-estar passaram a ser mais discutidas após a descoberta, em 2002, de um terceiro tipo de receptor na retina (RGC),

composto por células que se conectam com o sistema circadiano através da percepção da luz, informando nosso corpo como regular várias funções, tais como temperatura corporal, liberação de hormônios, qualidade de sono e produção de melatonina. Em virtude dessa relação imbricada entre disponibilidade de luz natural e saúde dos indivíduos, entende-se que, quando essa relação não está equilibrada, podem ocorrer afastamentos de funcionários por motivos de saúde. No que diz respeito aos edifícios de escritórios, isso pode apresentar impacto significativo nos gastos gerais de uma empresa, pois o custo da folha de pagamento dos funcionários é maior que os custos de operação dos edifícios. No entanto, o que lidera as pesquisas relacionadas a edifícios de escritório é o tema eficiência energética. Huang e Niu (2015), em um estudo sobre a história e sobre os novos potenciais de otimização das envoltórias construídas baseadas em simulações, demonstraram que cerca de 80% dos estudos estão relacionados à redução do consumo energético da edificação.

Turan et al. (2020), por sua vez, realizaram uma pesquisa na qual avaliaram o valor da luz natural em espaços de escritórios, e o resultado demonstrou que, em centros urbanos densos, os inquilinos valorizam a iluminação natural no interior dos ambientes. O estudo, ao revelar valor agregado em ambien-

tes com iluminação natural, sugere que a luz natural apresenta um valor chave no desenvolvimento de projetos, devendo ser considerada no planejamento e financiamento do projeto. O estudo realizou as análises com base na métrica de avaliação definida pela IES.

2.8.1 | ILUMINAÇÃO NATURAL E VOLUMETRIA DO EDIFÍCIO

Durante a História, civilizações criaram projetos de modo a responder à variação do sol ao longo do dia. Baseados no clima e na orientação solar, edifícios foram desenhados para permitir a penetração de luz, enquanto lidavam com diversas variações de climas e características geográficas. Projetar um edifício para maximizar a penetração de luz natural sempre requereu uma boa análise e planejamento. É na etapa inicial do desenvolvimento de projetos que são definidos aspectos relacionados à forma e à orientação do projeto arquitetônico, e essa fase é fundamental para o edifício apresentar melhor performance. Uma pesquisa realizada em 2014 (BRAGANÇA; VIEIRA; ANDRADE, 2014) com o objetivo de esclarecer as fases iniciais de um projeto de edifício concluiu que, na literatura disponível, embora recebam denominações diferentes, são identificadas as

mesmas etapas, sendo elas: a fase conceitual e fase de pré-projeto. A primeira inicia quando os objetivos são definidos e ela representa a fase de projeto preliminar do edifício, na qual a configuração geral do sistema é definida e os desenhos e layouts esquemáticos fornecerão uma configuração inicial do projeto, o tipo de arquitetura e os aspectos formais e funcionais. A fase de pré-projeto inicia com a implantação dos desenhos de trabalho, e a forma geral do edifício é desenvolvida por meio de plantas, seções e elevações, sendo que muitas informações são abordadas apenas conceitualmente. Nessas etapas iniciais, são considerados os layouts iniciais do edifício.

O lançamento do layout do espaço é uma das tarefas mais importantes no desenvolvimento de uma arquitetura e ocorre entre o 'projeto esquemático' e o 'desenvolvimento do projeto' na fase inicial do projeto (LOBOS; DONATH, 2010). Dentre os critérios racionais para concepção de um layout arquitetônico, estão o objetivo de obtenção de luz natural e outros, como vistas e acessibilidade (BRAGANÇA; VIEIRA; ANDRADE, 2014). Um estudo realizado no ano de 2019 nos Países Baixos, analisando diversos layouts de ambientes típicos de edifícios comerciais para uma mesma volumetria arquitetônica, constatou que os impactos na economia de energia relacionados ao

aproveitamento de luz natural foram bem mais significativos do que os impactos em relação à climatização artificial. O resultado demonstrou que a demanda de aquecimento para o pior layout é 12% maior do que para o melhor layout, que a demanda de refrigeração do pior layout é 10% maior do que o melhor layout, e que a demanda de iluminação do pior layout é 65% maior do que o melhor layout (DU et al., 2019).

A volumetria²³ define uma variável muito importante para o aproveitamento de luz natural: a profundidade dos ambientes. Estabelece também a área de superfícies de contato com o exterior de forma a limitar ou não a área das aberturas. Mary Guzowski (2010), em seu livro *Iluminação natural para projetos sustentáveis*, estipula três padrões distintos de formas arquitetônicas que já determinam maneiras de exploração da iluminação natural (Figura 18), são elas:

- Forma linear: são arquiteturas que apresentam comprimento do volume maior que a profundidade, e os ambientes se distribuem linearmente em planta. Arquiteturas com formas lineares podem explorar iluminação lateral e iluminação zenital. Quando os ambientes não apresentam grandes profundidades, a iluminação lateral já é suficiente.

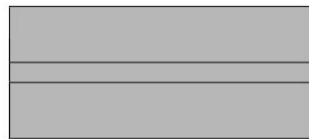
- Formas centrais: são arquiteturas que apresentam um núcleo central e os ambientes são organizados no entorno. Muitas vezes os volumes são bem densos e o comprimento é aproximadamente igual à largura da volumetria. Podem ser projetados para maximizar o aproveitamento de luz natural com a criação de zenitais nos núcleos centrais; todavia, dependendo da altura e da profundidade do volume, a combinação de iluminação lateral e zenital pode ser insuficiente para promover a iluminação natural no interior dos ambientes.

- Formas agrupadas: são formas compostas pelos agrupamentos de massas menores. As formas agrupadas permitem o aproveitamento de luz natural no interior dos espaços de forma mais fácil, pois apresentam grandes áreas de fachada.

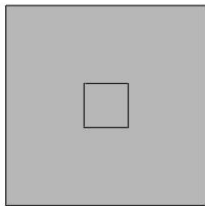
²³ Dimensões arquitetônicas de um edifício: largura, altura e profundidade.

Figura 18

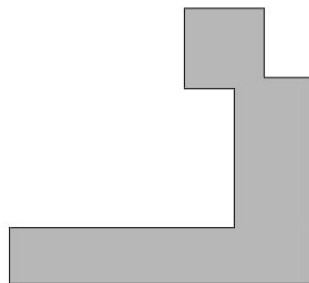
Exemplos de formas arquitetônicas



FORMA LINEAR



FORMA CENTRAL



FORMA AGRUPADA

Fonte: Elaborado pela autora.

2.8.2 | ILUMINAÇÃO E PROFUNDIDADE DOS AMBIENTES

A profundidade dos ambientes tende a ser o aspecto mais relevante para a otimização da luz natural no interior dos ambientes. Reinhart (2014) demonstrou a relação entre a altura da janela e a profundidade de ambientes com a luz natural no interior dos ambientes, considerando valores de referências dessas duas variáveis de regulamentações dos EUA, Reino Unido e Alemanha. O autor recomenda como regra geral a utilização de simulações para estabelecer essas relações, no entanto tem consciência de que os projetistas tendem a confiar em regras ou em experiências em vez de simulações, especialmente durante a fase inicial do projeto, o 'projeto esquemático'. Com isso, Reinhart realizou simulação para avaliar essas relações definidas pelas regulamentações que, de forma geral, apresentam valores de 1 a 2,5 vezes maiores que a dimensão da altura superior da janela para a área com iluminação natural do ambiente, embora não exista justificativa para o uso desses valores. O estudo foi realizado considerando cinco zonas de iluminação da América do Norte, variando a orientação e a geometria das fachadas de um ambiente padrão de escritório, e avaliou a autonomia de luz natural com e sem a operação de cortinas. Essa

pesquisa demonstrou que, sem considerar o sistema de fechamento interno, a maioria dos ambientes apresentou área com iluminação natural entre 1,5 e 2,5 vezes a altura da janela. No entanto, na presença de cortinas, esse valor é reduzido quase pela metade, podendo ser considerada uma área entre 1 e 2 vezes maior que a altura da janela.

Santos, Auer e Souza (2017) realizaram um estudo na cidade de Cuiabá, no qual buscaram quantificar e compreender a influência dos parâmetros relacionados às estratégias de planejamento urbano sobre a luz natural em ambientes fechados, usando a métrica de avaliação da IES ($sDA_{(300,50\%)}$), e um dos parâmetros analisados foi a profundidade dos ambientes. O estudo avaliou também a orientação das fachadas, a altura das edificações frontais ao ambiente e a distância de obstruções frontais. As simulações consideraram uma sala comercial com janela de altura de 1,8 m, com utilização de vidros com TL de 88% e peitoril opaco de 1 m, o que resulta em um ambiente com WWR de aproximadamente 60% resultado geral do estudo demonstrou que a profundidade dos ambientes teve o maior impacto nos resultados de sDA quando comparada com os outros parâmetros avaliados, e a orientação solar teve o menor impacto. Além disso, foi demonstrado que uma largura de rua (distância em

relação à obstrução frontal) de 5 m não é favorável para luz natural, pois apenas salas com 6 m de profundidade na orientação solar sul excederam o valor estabelecido como preferível pelos usuários, de acordo com a LM-83, ou seja, $sDA > 75\%$. No entanto, quando avaliados os modelos segundo o limite estabelecido como aceitável pela IES ($sDA > 55\%$), os cenários de atendimento do requisito aumentam significativamente. A sala avaliada com profundidade de 8 m só alcançou o sDA preferível no cenário analisado de rua de 15 m e com obstrução externa de no máximo 12 m (4 pavimentos) de altura, e a sala avaliada com 9 m de profundidade não atendeu ao critério em nenhum dos cenários. A média de sDA, considerando as quatro orientações solares, demonstrou que o norte foi a orientação que apresentou os menores resultados de sDA; leste e oeste apresentaram resultados de sDA muito semelhantes; e o sul, os maiores percentuais de sDA. Como conclusão do estudo para otimização da luz natural considerando os parâmetros analisados, larguras de vias de 20 m, profundidade de ambientes menores que 6 m e altura de edificações frontais menores que 41 m (13 pavimentos) ofereceram os melhores cenários. Os autores salientaram que o alvo de $sDA_{(300,50\%) > 75\%$ baseou-se em pesquisas de preferência dos usuários para latitude acima de 37° e que avaliações desse alvo

em diferentes latitudes e configurações de entorno são oportunidades de investigações.

Um estudo realizado em 2018, na cidade de São Paulo, (CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018) avaliou a distância da fachada que atende a intervalos de iluminâncias para as orientações norte, sul, leste e oeste considerando uma planta tipo de edifício comercial disposto no sentido longitudinal norte/sul e leste/oeste na cidade de São Paulo. Esses cenários foram avaliados com e sem o uso de proteções solares externas (brises), sendo considerado apenas um tipo de vidro nas fachadas (transmitância luminosa de 88%) e não sendo consideradas obstruções de entorno. O estudo avaliou a iluminação natural de acordo com o critério de UDI para o intervalo de iluminâncias entre 300 e 3.000 lux; o atendimento desse critério em 75% das horas do ano para o modelo com proteção solar externa foi possível em profundidades de ambientes de até 3,5 m da fachada leste, até 4,5 m da fachada norte e até 5 m das fachadas oeste e sul. Logo evidenciou-se dificuldade de obtenção de 75% de UDI 300-3.000 na área total do pavimento tipo, sendo que a fração da área desse pavimento que atendeu a tal critério para a planta disposta no eixo longitudinal no sentido leste/oeste foi de 38,3% e, quando o eixo longitudinal estava disposto no sentido

norte/sul, foi de 35,3%. No entanto os autores mencionaram que consideram admissível a ampliação da avaliação para intervalos de 100 lux a 3.000 lux, tendo em vista o caráter de flexibilidade crescente nos edifícios de escritórios, com áreas de transição e postos de trabalho coletivos e rotativos, alta disponibilidade de luz natural no céu de São Paulo e grande potencial de trabalhar elementos de controle solar na fachada.

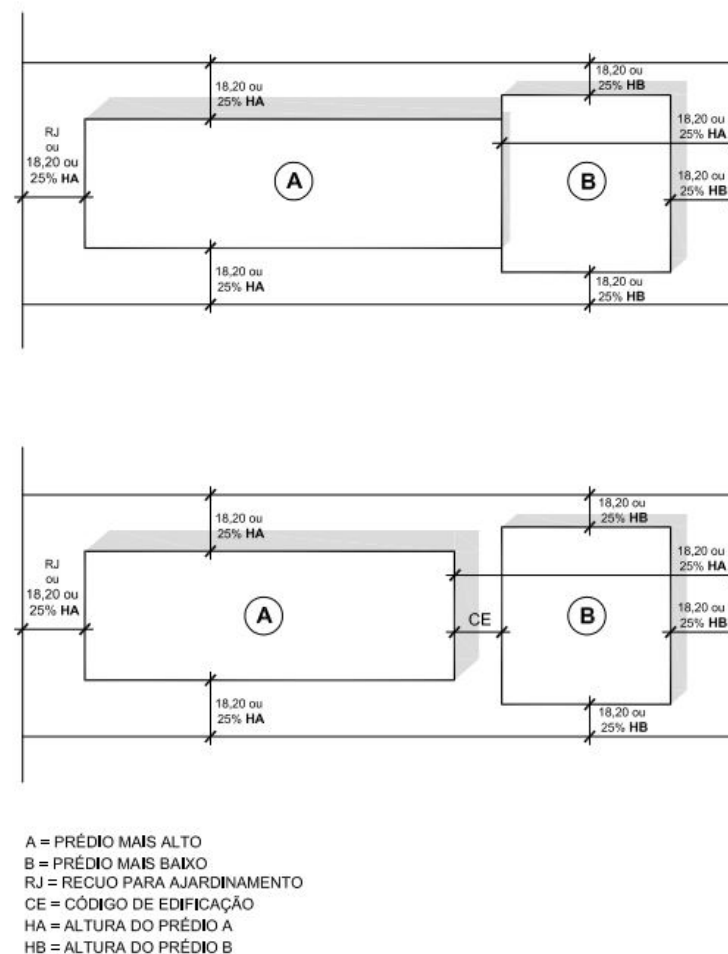
2.9 | REGULAMENTAÇÕES DA CIDADE DE PORTO ALEGRE E SUA RELAÇÃO COM A ILUMINAÇÃO

A cidade de Porto Alegre apresenta um Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano da cidade (PDDU_POA), que tem como objetivo organizar o crescimento da cidade e que foi atualizado pela última vez em 26 de outubro de 2010 (PORTO ALEGRE, 2010). De acordo com o atual Plano Diretor, as edificações precisam atender a diversas regulamentações relacionadas ao tipo de atividade, à densidade de habitantes, ao regime volumétrico etc. Entre essas regulamentações, duas apresentam impacto significativo na forma da edificação: o Regime Volumétrico e o Índice de Aproveitamento (IA). O Regime Volumétrico é um dispositivo de controle que regula a ocupação do lote, a altura da edificação e os afastamentos da edificação em relação

às divisas, ou recuos (frontais, laterais e de fundos). Para Porto Alegre, esse regime apresenta valores de altura máxima permitida que variam conforme a zona da cidade. O maior limite de altura permitido é de 52 m, sendo permitido um acréscimo de 2 m para acomodações da cobertura, para edificação que apresentem recuos em relação às divisas. Edificações construídas nos limites do terreno apresentam altura máxima permitida de 18 m. No que diz respeito aos afastamentos da edificação em relação às divisas (recuos), eles devem ser livres de construção e não podem ser inferiores a 18% da altura do prédio, garantindo um mínimo de 3 m aplicados desde a base do edifício. Esses afastamentos devem ser medidos a partir de cada volume construído, quando existirem volumes distintos em um mesmo lote, como apresentado nas imagens da figura 19. A altura da edificação é considerada a partir da Referência de Nível (RN) do terreno, que é definido considerando como base qualquer ponto natural do terreno. Em relação a ocupação do lote, são apresentados requisitos de Taxas de Ocupação (TO) máximas, que é a relação entre as projeções máximas de construções e as áreas do terreno.

Figura 19

Ilustração dos afastamentos em relação à divisa



Fonte: Porto Alegre, 2010.

O Índice de Aproveitamento (IA), por sua vez, regula a área máxima computável (partes do prédio utilizadas para atividades, ou seja, para moradia, trabalho, estudo etc.) que um terreno pode apresentar. De acordo com a zona da cidade, cada terreno possui um IA, que é um valor que, multiplicado pela área líquida de terreno, define a área máxima computável que a edificação pode apresentar. Tendo em vista que os empreendedores buscam atender ao potencial máximo do terreno para as construções, o Plano Diretor apresenta, muitas vezes, diretrizes de linguagens arquitetônicas que acabam ocasionando a construção de muitos edifícios similares em sua forma. Atualmente está sendo planejada uma atualização do PPDU_POA, abrindo a possibilidade de inserção das novas abordagens no documento sendo discutido a flexibilização da altura dos edifícios e a redução dos recuos obrigatórios entre edificações.

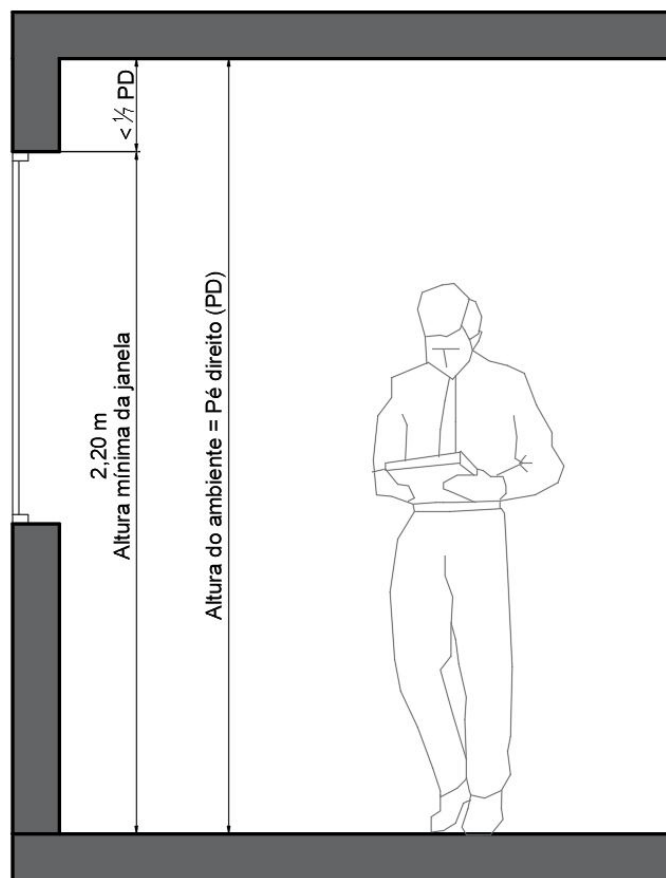
A cidade de Porto Alegre também possui um código de obras e a versão vigente é de outubro de 1992. Os códigos de obra visam estabelecer níveis mínimos de qualidade nas edificações em relação aos critérios de habitabilidade, durabilidade e segurança. O código possui uma seção com critérios de ventilação e iluminação, que apresenta os seguintes requisitos para que se atenda a um nível mínimo de iluminação natural em edi-

fícios não residenciais, como salas comerciais, escritórios, hotéis, escolas e hospitais:

- nenhum ambiente pode apresentar total de área de vão para o exterior inferior à fração de $\frac{1}{6}$ área de piso. Quando esse vão estiver localizado sob qualquer tipo de cobertura, a porção de área externa coberta deve ser somada à área do ambiente para fins de dimensionamento;
- a distância entre a parte superior da janela e o forro/laje não deve ser superior a $\frac{1}{7}$ da altura do pé-direito do ambiente, não devendo ficar à altura da janela com distância inferior a 2,20 m do piso (Figura 20). Esse requisito deve ser aplicado para, pelo menos, uma das janelas por ambiente.

Figura 20

Desenho explicativo do critério



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A definição de uma área mínima de abertura com o objetivo de garantir iluminação natural no interior dos ambientes é utilizada por muitos códigos de obras brasileiros, como é o caso do de Porto Alegre. Esse mesmo método de avaliação é uma das opções de atendimento do requisito obrigatório de iluminação natural da certificação WELL (IWBI, 2021a). A fim de comparar o tamanho mínimo de abertura permitida pelo Código de Obras de Porto Alegre e a área mínima de abertura permitida por ambiente do pré-requisito da certificação WELL, o Código de Obras da cidade permite que um ambiente de escritório com uma janela de 1,20 m x 1,20 m possua área de até 8,64 m² (vão de 1/6 da área do ambiente) e essa mesma janela poderia ser utilizada em um ambiente de até 20,57 m² (7% da área do ambiente), para atendimento do pré-requisito da certificação WELL.

Susan Winchip, em seu livro *Designing a quality light environment* (2005), menciona que, em geral, para maximizar a luz natural no interior dos ambientes, eles devem ter abertura de 1/4 da área de piso, ou seja, o exemplo de uma janela de 1,20 m x 1,20 m poderia atender a um ambiente de até 5,76 m². A autora menciona também que janelas verticais e horizontais permitem a entrada de aproximadamente a mesma quantidade

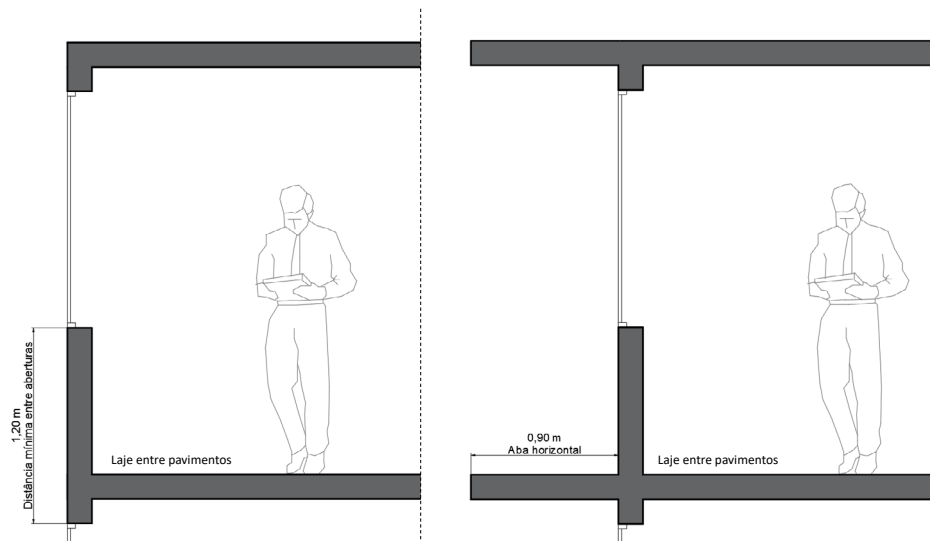
de luz natural e que, para maximizar a luz natural no interior de um ambiente, a janela deve ser posicionada na maior altura possível, próxima ao forro, de forma que a luz refletida no forro seja direcionada para dentro do ambiente. No entanto, devido à evolução da tecnologia dos vidros e à grande diversidade de características existentes, essa avaliação não garante níveis mínimos necessários de luz natural no interior dos ambientes.

Outra regulamentação que influencia no tamanho das aberturas e conseqüentemente pode influenciar no aproveitamento de luz natural no interior dos ambientes é o Código de Proteção contra Incêndio da cidade de Porto Alegre. Este Código (Lei Complementar no 420/1998) (PORTO ALEGRE, 2001) apresenta condicionantes que definem a classificação do grau de dificuldade da propagação do fogo em uma edificação de acordo com a distância entre as superfícies envidraçadas entre os pavimentos, fator que pode interferir no aproveitamento de luz natural no interior dos ambientes. De acordo com esse código, as edificações são classificadas como tipo X (edificações em que a propagação do fogo é fácil), tipo Y (edificações com mediana resistência ao fogo) e tipo Z (edificações em que a propagação do fogo é difícil). As edificações do tipo X são aquelas que apresentam qualquer peça estrutural ou entrepiso combustível

ou não resistente ao fogo. Para serem classificadas como tipo Y ou Z, são avaliadas as condições de risco da edificação, sendo um dos critérios o isolamento entre os pavimentos; nesse sentido, a edificação será classificada como tipo Z quando apresentar esse isolamento e, como tipo Y, quando não o apresentar. Os pavimentos, para serem isolados entre si, precisam ter afastamento mínimo entre vergas e peitoris de aberturas situados em pavimentos consecutivos de 1,20 m. Essa distância entre aberturas pode ser substituída por aba horizontal de concreto armado que avance 0,90 m da face da edificação com a mesma resistência ao fogo do contrapiso (Figura 21).

Figura 21

Corte esquemático demonstrando os requisitos para classificação de pavimentos isolados entre si de acordo com o Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre.



Distância mínima entre aberturas (à esquerda) e distância da aba de proteção horizontal (à direita).

Fonte: Elaborado pela autora.

No contexto brasileiro, o Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, PROCEL EDIFICA, também pode influenciar a autonomia de luz natural no interior dos ambientes. Este programa, instituído em 2003, criou o selo brasileiro de avaliação de edifícios eficiente e tem o objetivo de incentivar a conservação e o uso eficientes dos recursos naturais (água, luz, ventilação) nas edificações, reduzindo os desperdícios e os impactos sobre o meio ambiente. O manual para obtenção desse selo está na quarta versão, sendo a última do ano de 2016, mas ela ainda não aborda aspectos relacionados à saúde e ao bem-estar dos usuários do edifício, nem requisitos mínimos de luz natural no interior da edificação.



Capítulo 03

Metodologia

Metodologia

Neste capítulo são descritos o método e os procedimentos para atendimento dos objetivos do trabalho. Os procedimentos estão divididos em seis etapas, as quais serão discutidas nos subcapítulos seguintes:

1. definição do local e modelo de estudo;
2. definição dos parâmetros de transmitância luminosa (TL) dos vidros;
3. definição dos parâmetros de simulação computacional e dos procedimentos de análise;
4. sistematização dos resultados das análises do impacto da orientação solar da quadra e do entorno;
5. sistematização das análises comparativas entre profundidade x TL de vidros x orientação geográfica

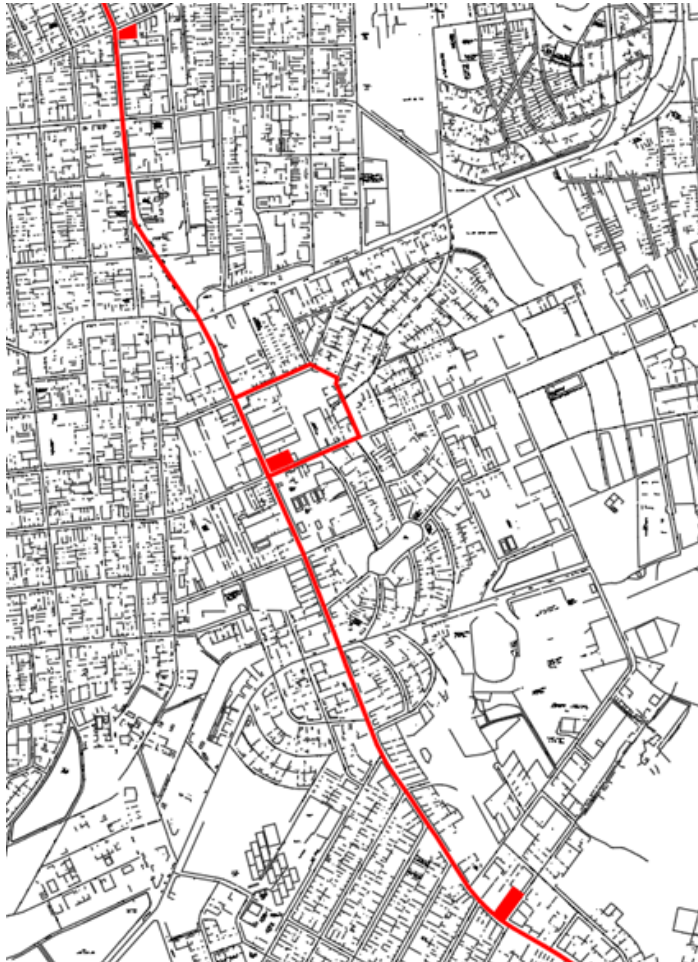
6. sistematização das análises do impacto da metodologia de operação de cortinas nos resultados de sDA.

3.1 | ETAPA 1: DEFINIÇÃO DO LOCAL E MODELO DE ESTUDO

O local do estudo na cidade de Porto Alegre é um terreno na Avenida Carlos Gomes localizado na quadra compreendida entre a Rua Campos Sales e a Rua Anita Garibaldi (Figuras 22 e 23). Esse terreno foi selecionado, pois há uma construção em etapa inicial e a quadra apresenta as demais construções recentes, estando, portanto, consolidada. Essa avenida apresenta grande crescimento de construções de edifícios comerciais e é nela que estão localizados os três únicos edifícios comerciais que apresentam certificação LEED na cidade até o ano de 2021 (Figura 22).

Figura 22

Mapa com a identificação da quadra de estudo



Mapa com marcação da terceira perimetral e do contorno da quadra selecionada para o estudo. As hachuras sólidas identificam os três edifícios da cidade que possuem certificação LEED.

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 23

Google maps com a identificação da quadra e a marcação do terreno em estudo

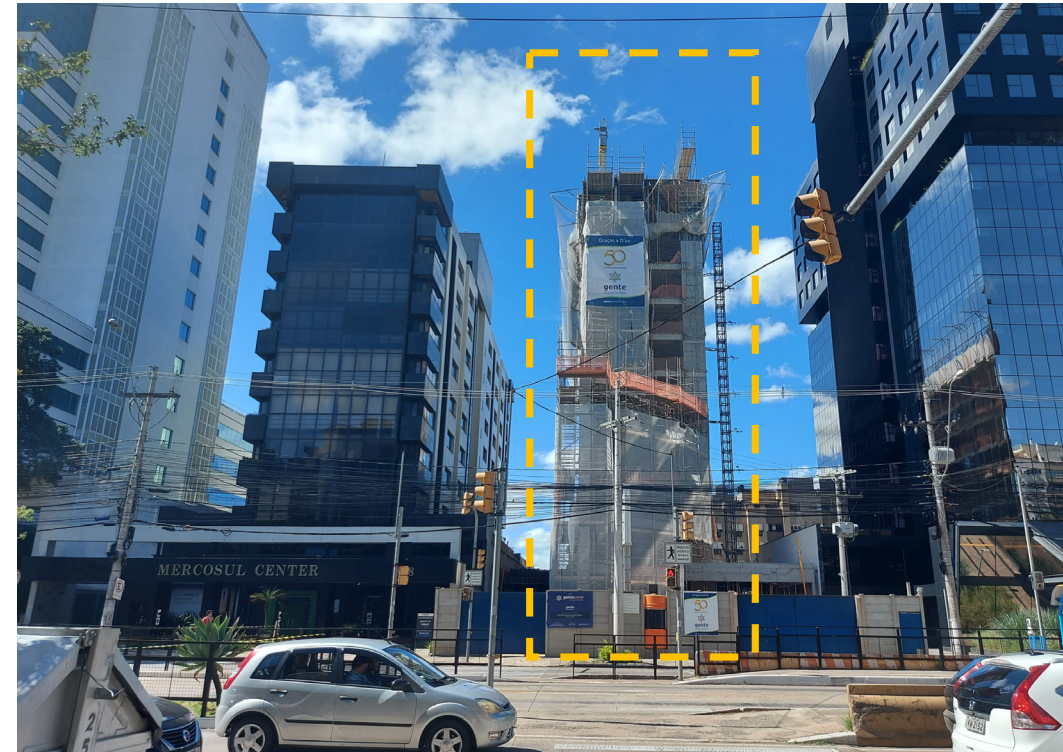


Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com o levantamento realizado no local, foi possível identificar que quatro dos cinco edifícios construídos nos terrenos alinhados com a Avenida Carlos Gomes apresentam altura máxima próxima da altura permitida (52 m + 2 m de acomodação de cobertura) e, conseqüentemente, afastamento mínimo permitido pelo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano e Ambiental de Porto Alegre - PDDUA em relação aos alinhamentos laterais e de fundos (18% em relação à altura) (PORTO ALEGRE, 2010). Foi possível também a confirmação da altura de duas edificações da quadra (edificação de 62 m e uma das edificações da esquina de 54 m). Por aproximação, as demais edificações foram consideradas com altura de 54 m (máximo permitido), e a única edificação da quadra que apresenta altura inferior foi estimada com 33 m, sendo considerado 3 m de pé-direito por pavimento existente (Figuras 24 e 25).

Figura 24

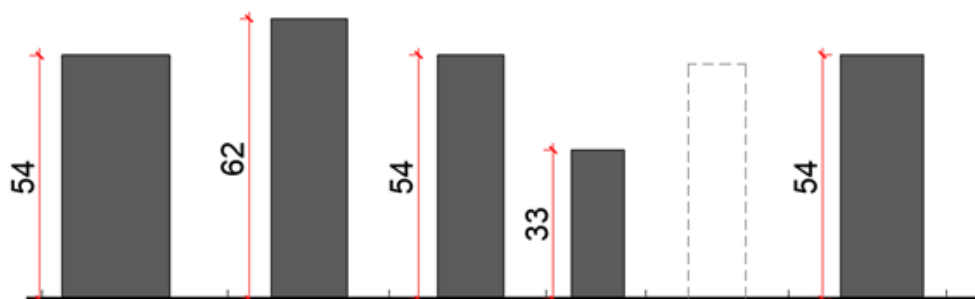
Vista das edificações situadas na Avenida Carlos Gomes em Porto Alegre - RS com indicação do terreno selecionado para o estudo de caso



Fonte: Google.

Figura 25

Vista da relação de altura (m) das edificações na quadra da Avenida Carlos Gomes em Porto Alegre com destaque para a volumetria de estudo (tracejado)

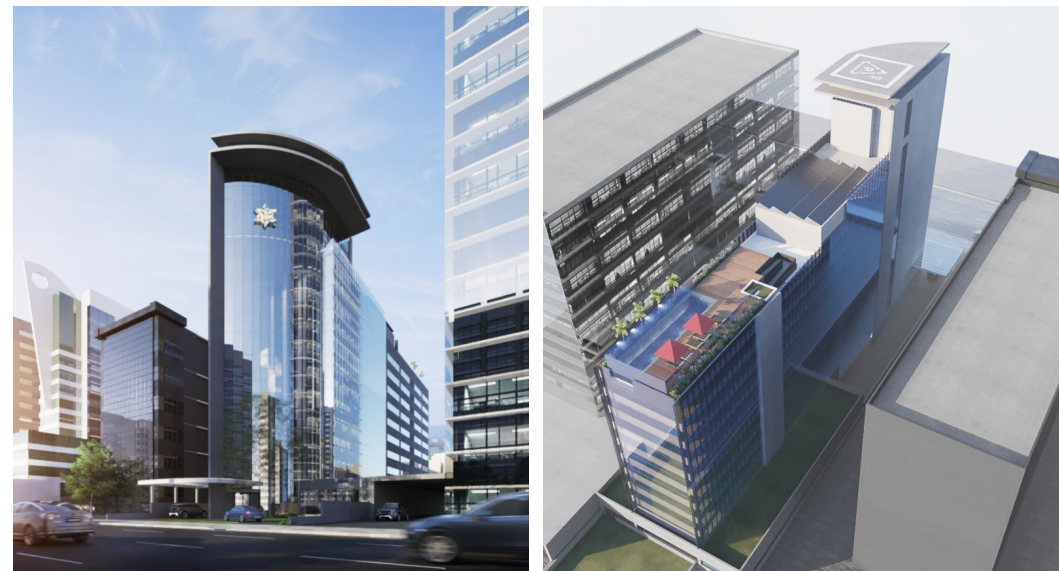


Fonte: Elaborado pela autora.

O terreno selecionado apresenta dimensões de 98 m x 31 m com a testada direcionada para o sudoeste, inclinado 24° em direção ao sul. Imagens comerciais do futuro empreendimento - ainda em etapa inicial de execução - demonstram que a edificação vai alcançar altura próxima da máxima permitida para o local e que possui fachadas envidraçadas (Figura 26).

Figura 26

Vista frontal e aérea do edifício a ser implantado no terreno selecionado para o estudo de caso



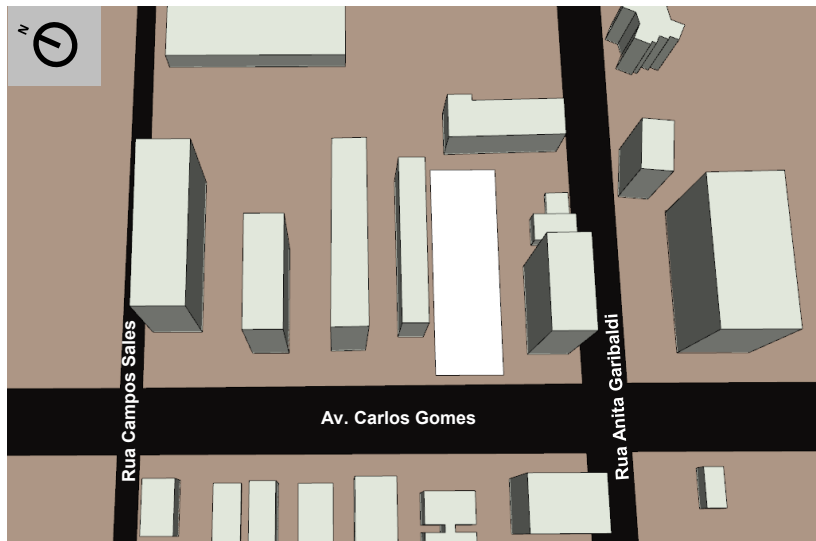
Fonte: Site da incorporadora Gente²⁴.

²⁴ <http://genteincorporadora.com.br/20>. Acesso em: set. 2021

A Avenida Carlos Gomes apresenta largura de 30 m e as edificações existentes em frente à quadra de estudo, do outro lado da via, apresentam alturas bem inferiores (aproximadamente 24 m) em relação à máxima permitida, com exceção da edificação localizada na esquina com a Avenida Anita Garibaldi, que tem uma altura de aproximadamente 42 m. A configuração de entorno do terreno em estudo é apresentada na Figura 27.

Figura 27

Vista superior perspectivada do terreno do estudo de caso (indicado em branco) com o entorno imediato (indicado em cinza)



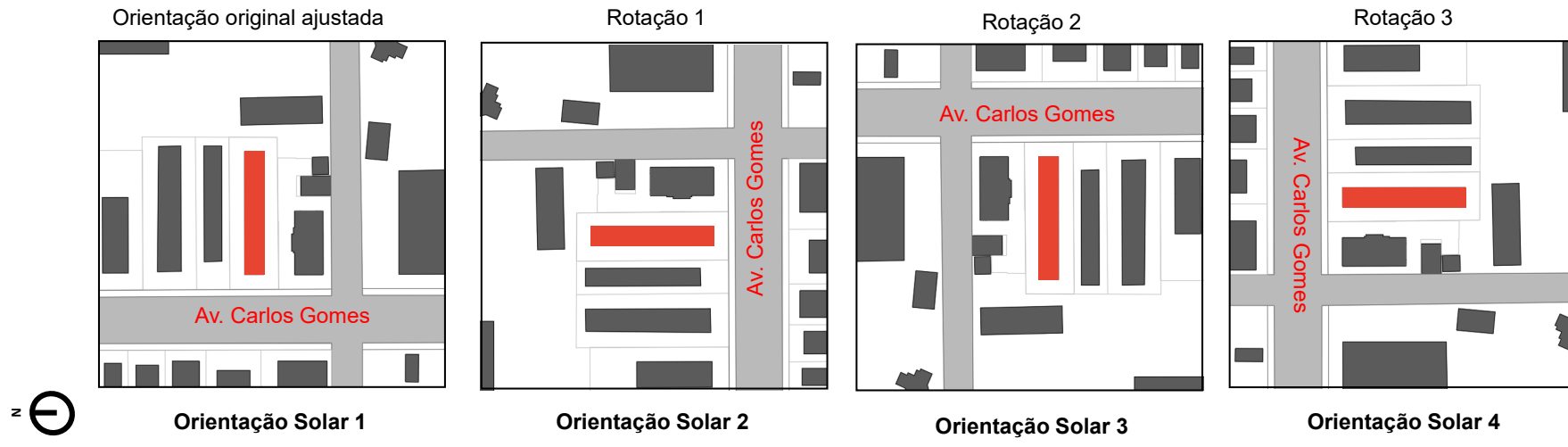
Fonte: Elaborado pela autora.

3.1.1 | PARÂMETROS DO MODELO DE ESTUDO

Para um melhor entendimento do impacto da orientação solar nos resultados, a quadra de estudo foi rotacionada 24° em relação ao norte, de modo que o sentido longitudinal do terreno permanecesse no eixo leste/oeste exato. Com isso, foram realizadas simulações considerando o eixo longitudinal do terreno no sentido leste/oeste, orientação similar à do terreno, e mais três avaliações considerando rotações de 90° a fim de avaliar o comportamento das fachadas direcionadas para o norte, o sul, o leste e o oeste, nas diferentes configurações de entorno (Figura 28).

Figura 28

Diferentes posições da quadra e da edificação de estudo, em vermelho, em relação à orientação solar

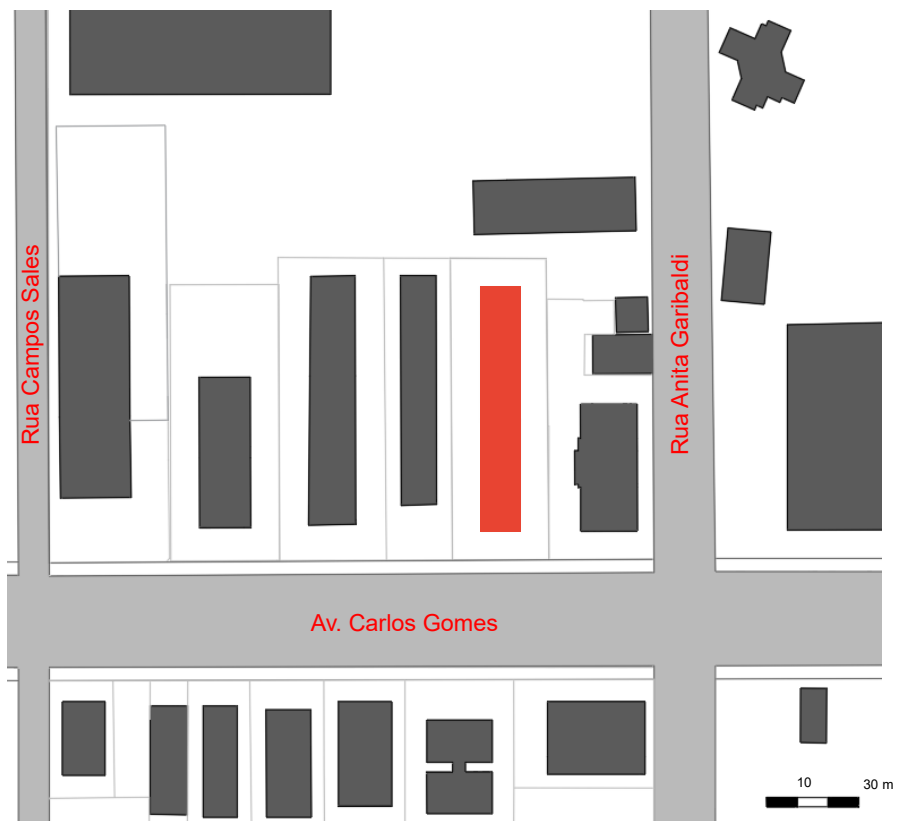


Fonte: Elaborado pela autora.

Para o estudo, foi definida uma área de pavimento tipo com dimensões de 79 m x 13 m, que é a dimensão máxima permitida pela legislação local, incluindo os afastamentos necessários em relação às divisas (18% da altura total), quando considerada uma edificação com altura de 52 m. Essas dimensões resultam em uma volumetria com taxa de ocupação no terreno de 33,45% (Figuras 29 e 30), ou seja, com área de 1.027 m², que é similar à média da TO dos edifícios com certificação LEED na cidade, que é de 37%.

Figura 29

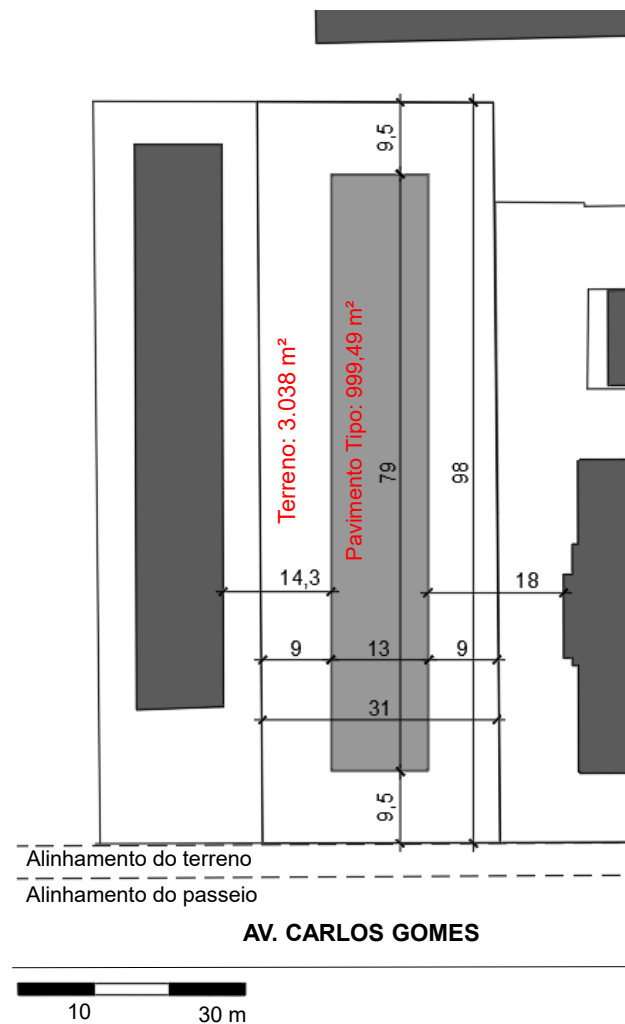
Imagem da projeção da edificação de estudo no lote, em vermelho, e da sua relação com a quadra definida pelas ruas Campos Sales e Anita Garibaldi



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 30

Terreno e projeção do pavimento tipo no lote

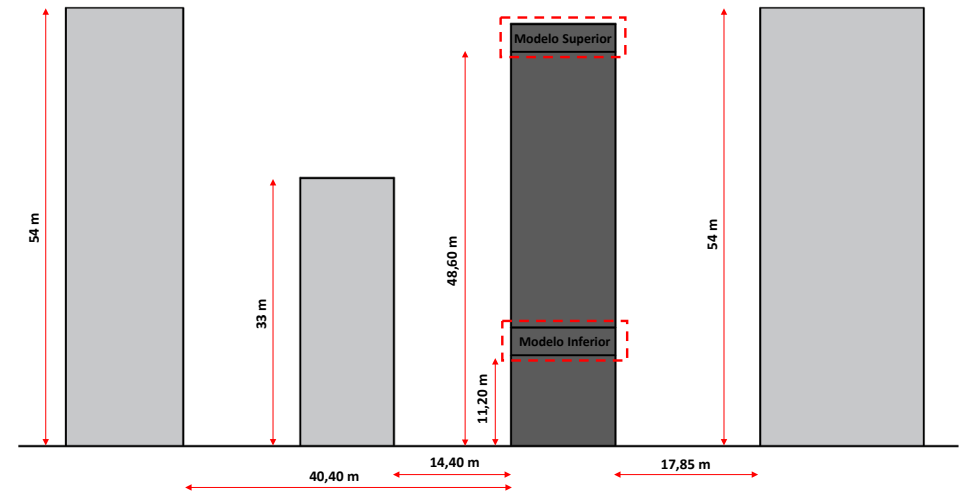


Fonte: Elaborado pela autora.

A volumetria de 52 m considerada para o estudo foi dividida em pavimentos com distância entre lajes de 3,40 m. Para um melhor entendimento do impacto do entorno nos resultados, foram realizadas simulações considerando o pavimento tipo localizado no pavimento inferior (4° pavimento) e superior da volumetria (15° pavimento). Foi definido que os três primeiros pavimentos da edificação seriam destinados para áreas de uso comum da edificação, como observado nos três edifícios com certificação LEED na cidade. Com isso, considerou-se que a altura do piso do pavimento superior é de 48,60 m e do piso do pavimento inferior é de 11,20 m (Figura 31).

Figura 31

Vista esquemática dos modelos Inferior e Superior de estudo com o entorno mais próximo e as respectivas alturas

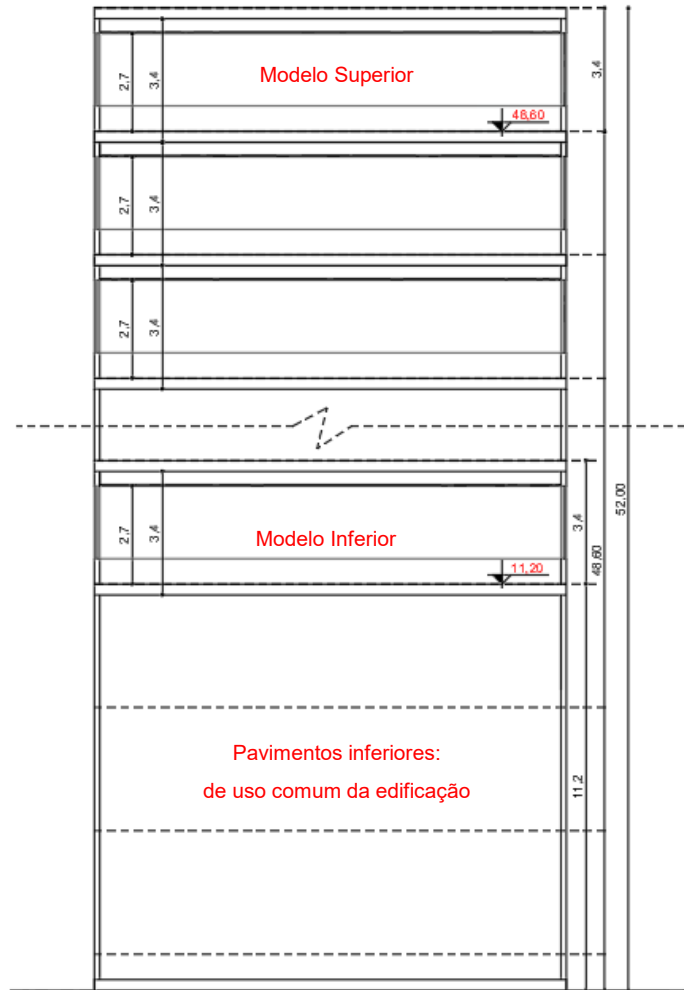


Fonte: Elaborado pela autora.

O pé-direito (altura até o forro) foi considerado como sendo de 2,70 m (Figura 32), pois essa foi a média de altura encontrada quando observada essa característica nos três edifícios que apresentam certificação LEED na cidade.

Figura 32

Corte esquemático dos modelos Inferior e Superior de estudo com as alturas consideradas



Fonte: Elaborado pela autora.

Tendo em vista que o foco do estudo são edificações com pele de vidro, o modelo do pavimento tipo apresenta as características sintetizadas no Quadro 7. Essas características consideram a necessidade de afastamento entre borda inferior da verga e borda superior do peitoril das aberturas situadas em pavimentos consecutivos de, pelo menos, 1,20 m, de acordo com Código de Proteção contra Incêndio de Porto Alegre (Lei Complementar no 420) (PORTO ALEGRE, 2001). Então, foi considerado o pavimento tipo com peitoril opaco de 0,50 m (Figura 33). As análises consideram como a área comercial do pavimento a área do pavimento com redução de 20%, tendo em vista que os critérios de autonomia de luz natural não precisam ser avaliados em ambientes de circulação e serviços da edificação. Optou-se pela não definição de um núcleo de circulações fixo, para que seja possível considerar a localização desse núcleo nos locais de maior carência de luz natural.

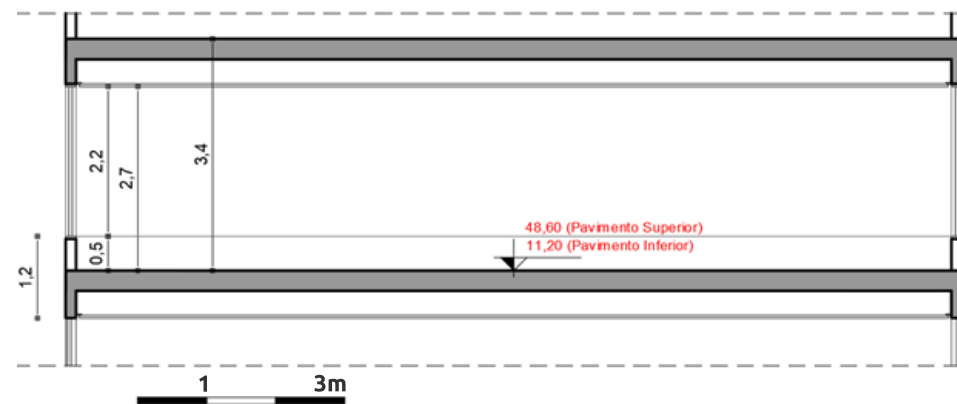
Quadro 7 - Características dos modelos de estudo (Inferior e Superior)

Dimensões do terreno	98 m x 31 m
Área do terreno	3.038 m ²
Dimensões externas do pavimento	79 m x 13 m
Dimensões internas do pavimento	78,70 m x 12,70 m
Área do pavimento	999,49 m ²
Pé-direto	2,70 m
Área estimada para circulações - core (20% da área total)	199,90 m ²
Área comercial	799,59 m ²
WWR (% de área de abertura em relação à área da parede)	54%
% de área de abertura em relação à área de piso comercial	50,6%

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33

Corte dos modelos de estudo (Inferior e Superior)



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2 | ETAPA 2: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE TRANSMITÂNCIA LUMINOSA (TL) DOS VIDROS

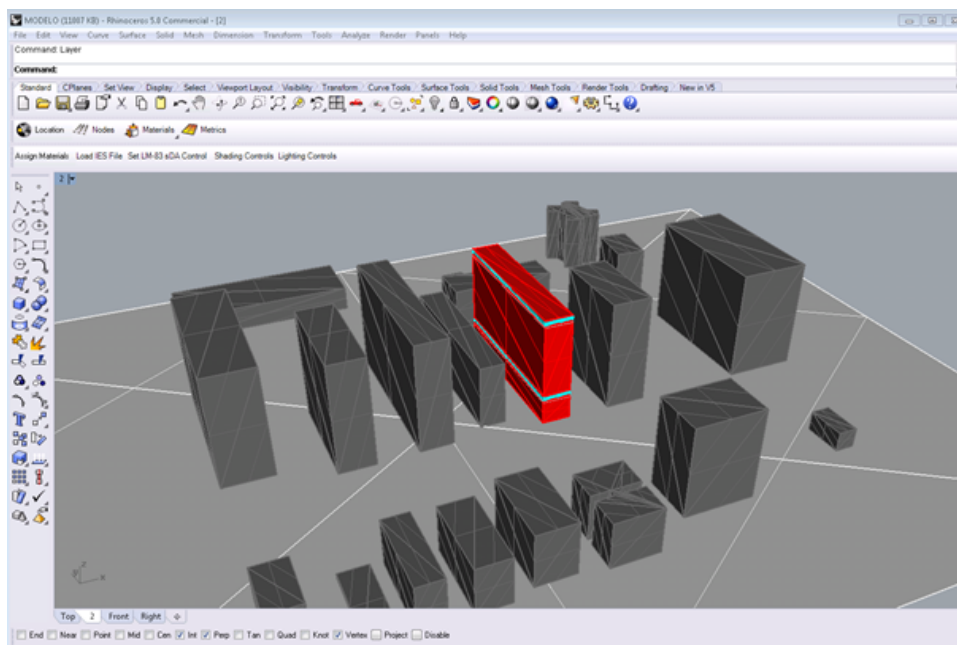
Os valores de Transmitância Luminosa (TL) dos vidros selecionados para o estudo foram as seguintes: 30%, 40%, 60% e 88%. A TL de 30% foi selecionada por ser característica de vidros que não apresentam espectro seletivo e que apresentam valores de Fator Solar próximos de 24%, valor utilizado como referência pela certificação LEED para a avaliação da eficiência da edificação. Além disso, essa é a TL dos vidros de dois dos três edifícios certificados LEED em Porto Alegre. A TL de 40% foi escolhida por ser o valor de referência mínimo para atendimento dos critérios da otimização da certificação WELL pelo método de distância mínima das estações de trabalho em relação às fachadas; a TL de 60%, por sua vez, foi selecionada por ser o valor máximo encontrado em vidros com Fator Solar baixo. Por fim foi escolhida a TL de 88% para uma possível comparação dos resultados de edificações que utilizam vidros sem proteção térmica.

3.3 | ETAPA 3: DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E DOS PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

O estudo avaliou os resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ segundo a metodologia do IES LM-83 e as recomendações da IES, sendo considerado o valor de $sDA_{(300,50\%)}$ maior que 55% como aceitável e maior que 75% como preferível. As análises foram realizadas através do plugin DIVA 4.0 (*Design Iterate Validate Adapt*) for Rhino (Solemma LLC), sendo o modelo geométrico construído no programa SketchUp 2016 (Trimble) e exportado para o *software* Rhinoceros 5 (McNeel), no qual o plugin é executado (Figura 34).

Figura 34

Perspectiva do modelo geométrico (em vermelho) e o entorno considerado (em cinza)



Fonte: Elaborado pela autora.

O programa Diva é uma ferramenta que faz uso do método de raio reverso (*ray-tracing*) e do modelo de céu de Perez

através dos coeficientes do programa *Radiance* para a realização das análises e que permite realizar simulações baseadas em dias específicos, além de calcular métricas anuais baseadas no clima de modo a considerar valores de irradiação difusa e direta conforme com os dados do arquivo climático do local. Ele foi desenvolvido entre 2009 e 2011 pela escola de graduação em Design da Universidade de Harvard e é administrado pela Solemma LLC.

O programa possui parâmetros de entrada, utilizados pelo Radiance, que foram os valores comumente utilizados, como apresentado na seção 1.8, sendo o valor de ab , ambiente bounces, definido como 5, uma vez que a fachada não apresenta geometrias complexas. As simulações para identificação de iluminâncias oriundas apenas da incidência direta de sol foram realizadas através de avaliações de $DA_{(1000)}$ com o parâmetro $ab=0$. Para operação das cortinas e persianas, a malha de cálculo do pavimento foi subdividida em grupos de controle, seguindo as orientações de divisão de acordo com as definições da IES. O modelo de sombreamento dinâmico do programa Diva, que segue as orientações do IES-LM83, considera que a cortina reflete toda a luz solar direta e permite apenas a passagem de 25% da luz solar difusa na detecção de presença de incidência direta

de sol. Segundo a metodologia da IES, para essa operação, é acionado o fechamento do sistema de proteção interno sempre que for detectada a presença de incidência direta de sol em, pelo menos, cinco pontos dos grupos de controles maiores, que apresentam área de 144 m² e de 163 m² (grupos 2, 3, 4, 8, 7 e 6), e em, pelo menos, três pontos dos grupo de controles menores, que apresentam área de 40 m² (grupos 1 e 5) (Figura 35).

Figura 35

Identificação dos grupos de pontos para resposta na operação de cortinas do programa



Fonte: Elaborado pela autora.

A malha de pontos considerada nas simulações apresenta altura de 0,80 m, seguindo as orientações da IES. O espaçamento entre os pontos é de 0,55 m, que corresponde à distância que foi gerada automaticamente pelo programa após ser configurada a diretriz de espaçamento máximo de 0,60 m, distância máxima permitida para avaliação de acordo com a LEED v4. As características dos revestimentos dos acabamentos internos foram consideradas também conforme a orientação da certificação LEED, que menciona que as refletâncias devem ter valores de 80%, 50% e 20% para teto, parede e piso, respectivamente, em casos de ausência dessa informação. A refletância do entorno foi considerada como sendo de 30% e a do piso externo, de 10%; esses valores são comumente utilizados e mencionados como referência no IES-LM 83. As análises consideram uma ocupação de 10 horas diárias de disponibilidade de luz natural, das 8h às 18h, para 365 dias, totalizando 3.650 horas, também seguindo os padrões de ocupação do IES-LM 83. Os arquivos climáticos empregados nas análises possuem a extensão EPW²⁵

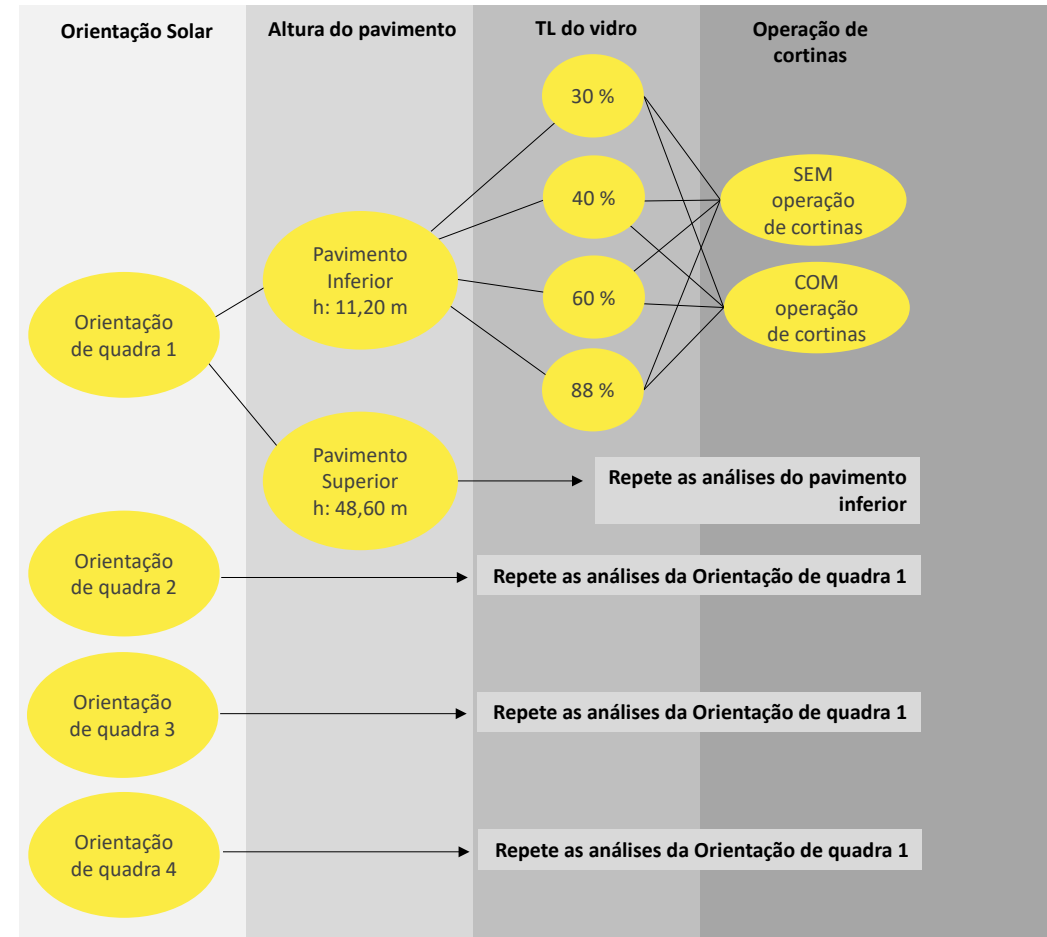
²⁵ *EnergyPlus Weather Format*. Padrão de arquivo com dados climáticos para simulação computacional desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos.

e escolheu-se, para a realização dos estudos, o arquivo climático no formato TMY (*Typical Meteorological Year*). Esse arquivo é obtido selecionando um ano real entre o intervalo de anos de um período. A identificação do ano típico é baseada em um processo de exclusão que visa eliminar anos caracterizados por meses com temperaturas médias muito altas ou baixas até restar apenas um ano. Os arquivos TMY apresentam, entre outros dados, valores de irradiâncias global horizontal, direta normal e difusa horizontal, e apresentam maior representatividade da luz natural e radiação solar (CARVALHO, 2014 apud HAZBOUN, 2018). O arquivo climático utilizado no estudo está disponível no site da *Climate. OneBuilding*²⁶, no qual são detalhados os dados de um intervalo de 15 anos, compreendido entre os anos de 2004 e 2018. A síntese das simulações realizadas é apresentada na Figura 36 e complementada pelo Quadro 8, no qual pode-se observar que há um total de 64 configurações para simulações.

²⁶ http://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/BRA_Brazil/index.html#IDRS_Rio_Grande_do_Sul.

Figura 36

Matriz de análise



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 8 - Variáveis selecionadas, quantidades e valores considerados

Análise	Variável/unidade	Número de variáveis	Variável/unidade
1	Orientação solar (Eixo longitudinal do terreno)	4	1: Leste/Oeste 2: Norte/Sul
2	Impacto da altura do pavimento considerado (m)	2	Modelo A (cota: 11,20 m) Modelo B (cota: 48,60 m)
3	Transmitância do Vidro TL (%)	4	TL: 30 % TL: 40 % TL: 60 % TL: 88 %
5	Proteção solar interna (cortinas/persianas) Passagem de 25% da luz solar difusa	2	Operação IES LM 83-12 Inexistente
Total de simulações::		64	

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 | ETAPA 4: SISTEMATIZAÇÃO DOS RESULTADOS DAS ANÁLISES DO IMPACTO DA ORIENTAÇÃO SOLAR DA QUADRA E DO ENTORNO

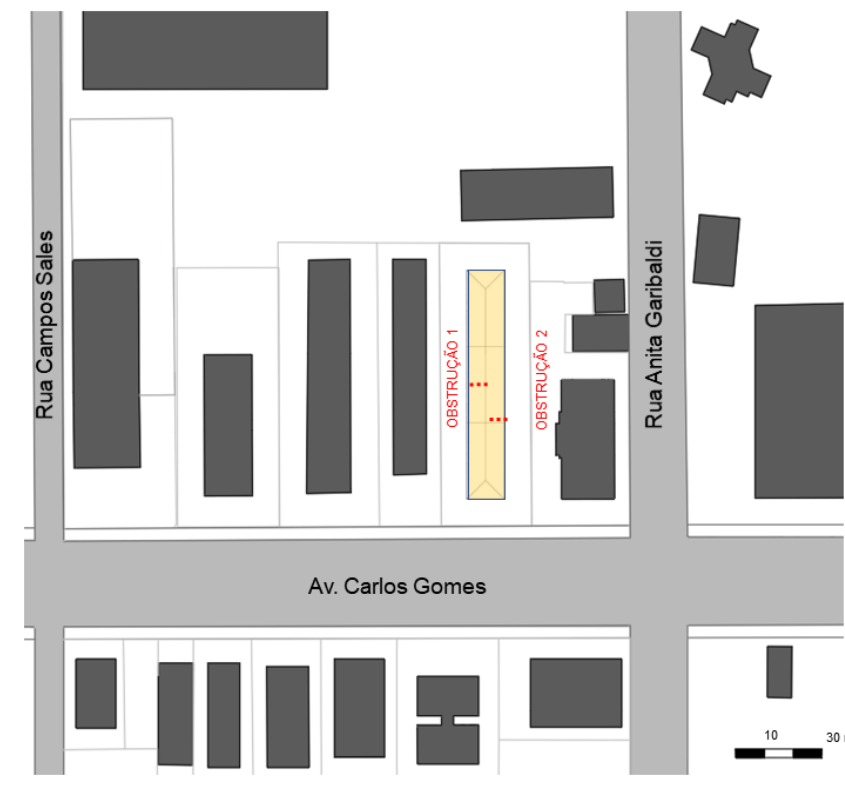
Para a análise do impacto da orientação solar e do entorno, foram comparados os resultados das quatro orientações de quadra consideradas. No que diz respeito à análise do impacto do entorno, foram confrontados os resultados de autonomia de luz natural obtidos nas simulações do pavimento inferior, considerando a presença das obstruções, com as do pavimento superior, que não apresenta influência insignificativa do entorno devido ao fato de a altura da edificação mais próxima da obstrução 1 ser inferior e a da obstrução 2 ser similar. Os resultados de autonomia de luz natural foram analisados a partir do tratamento dos dados obtidos nas simulações em planilhas eletrônicas e são sintetizados através de gráficos percentuais.

3.5 | ETAPA 5: SISTEMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES COMPARATIVAS ENTRE PROFUNDIDADE X TL DE VIDROS X ORIENTAÇÃO GEOGRÁFICA

Para verificação da profundidade do ambiente com autonomia de luz natural de acordo com a orientação geográfica, foram avaliados os resultados perpendiculares às fachadas de maior extensão (79 m) do modelo de estudo considerando as orientações solares de quadra estudadas. Esses resultados demonstram um comportamento mais característico oriundo da influência de uma orientação específica, uma vez recebem menor impacto das aberturas de fachadas perpendiculares devido à extensão da fachada. A fim de avaliar, também, o impacto do entorno nesses resultados, foram selecionados o eixo perpendicular dessas fachadas próximo ao centro da obstrução vizinha, o eixo perpendicular central da obstrução 1 e o eixo perpendicular central da obstrução 2, de modo que fosse possível entender o comportamento das fachadas com os dois tipos de obstruções do entorno, que foram definidas como obstrução 1 e obstrução 2 (Figuras 37 e 38).

Figura 37

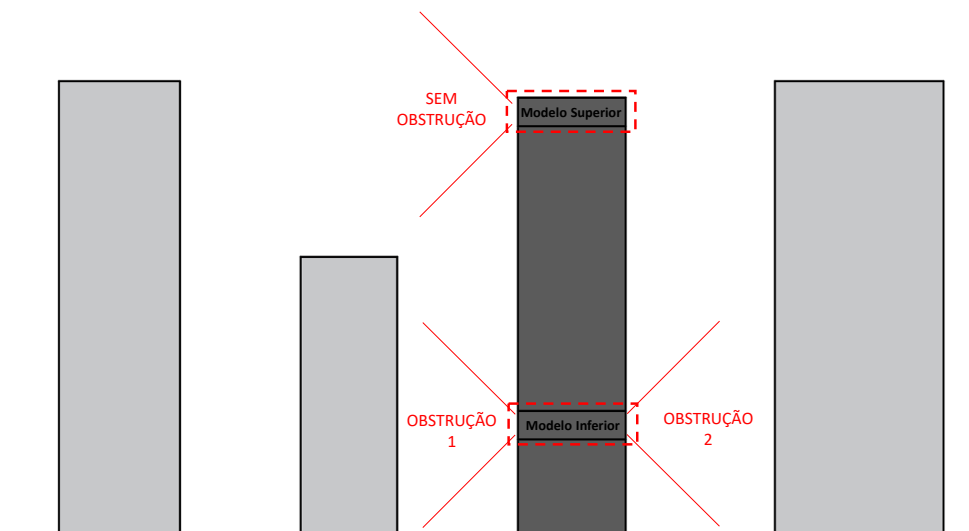
Planta baixa do pavimento tipo com os dois eixos de avaliação, em vermelho, e a indicação das obstruções



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 38

Corte com a identificação das obstruções 1 e 2 e do cenário sem obstrução.

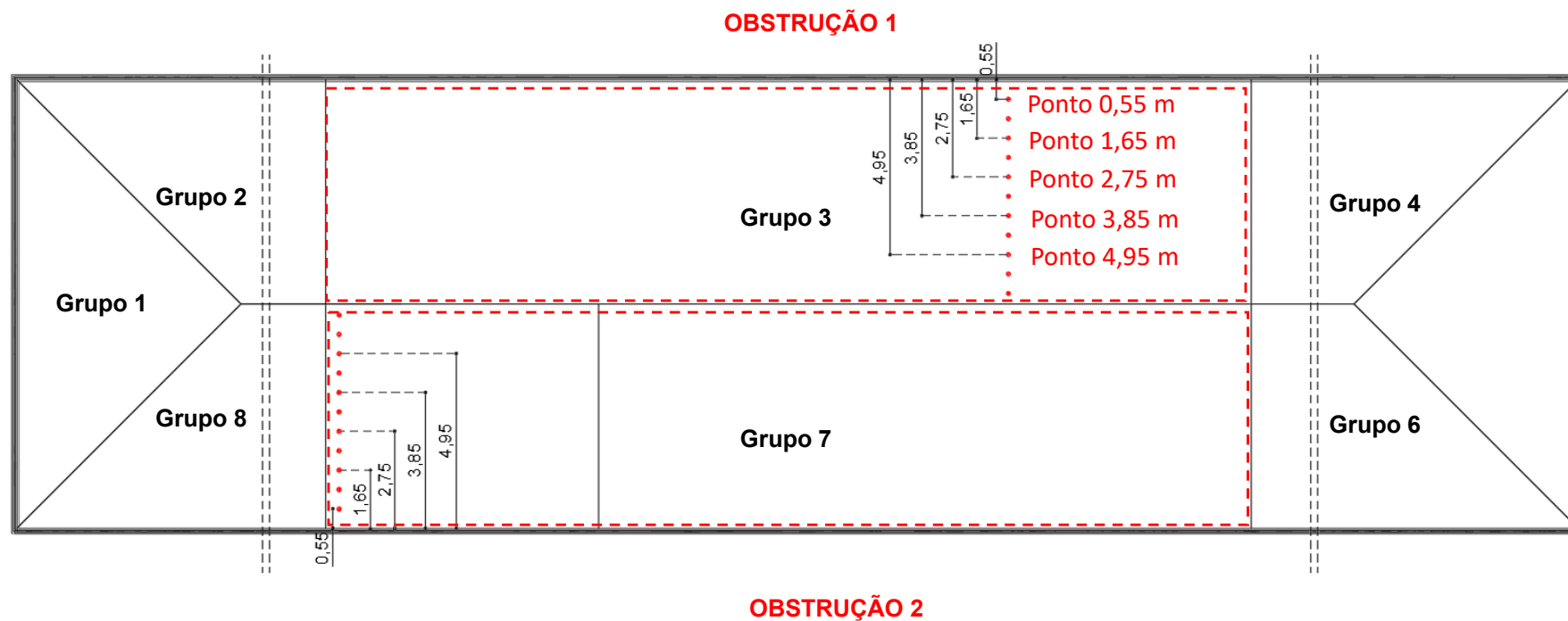


Fonte: Elaborado pela autora.

A edificação mais próxima do modelo de estudo da obstrução 1 apresenta altura inferior em relação à edificação mais representativa da obstrução 2. No entanto, a taxa de ocupação (TO) do prédio da obstrução 1 que faz divisa com o objeto de estudo apresenta uma TO duas vezes superior à do prédio que faz divisa com o objeto de estudo do lado considerado como obstrução 2, sendo os valores de TO de, respectivamente, 40% e de 20%. Os resultados dos pontos perpendiculares às fachadas de maior extensão da volumetria de estudo foram avaliados no intervalo entre dois pontos da malha de cálculo gerada pelo programa, ou seja, em uma distância de 1,10 m. Foram avaliados cinco pontos, resultando na distância em relação à fachada do primeiro ponto de 0,55 m e do último ponto de 4,95 m, sendo esses os pontos que compreendem a distância de duas vezes a altura da janela (5,40 m). O nome do ponto corresponde a distância do ponto em relação à fachada (Figura 39).

Figura 39

Planta baixa do pavimento tipo com indicação dos pontos selecionados para avaliação de $DA_{(300)}$



Fonte: Elaborado pela autora.

De modo a estimar a distância máxima de configuração de ambientes que atendam ao critério de autonomia de $DA_{(300,50\%)}$ para, pelo menos, 55% da área, foi considerada a distância do último ponto com autonomia de 300 lux para 50% do tempo com o acréscimo de 45% dessa distância. Da mesma maneira, para verificação da profundidade de ambientes de modo a atender ao critério de $DA_{(300,50\%)}$ para, pelo menos, 75% da área do ambiente, foi considerada a distância do último ponto com atendimento com um acréscimo de 25% dessa distância.

3.6 | ETAPA 6: SISTEMATIZAÇÃO DAS ANÁLISES DO IMPACTO DA METODOLOGIA DE OPERAÇÃO DE CORTINAS NOS RESULTADOS DE sDA

Os resultados obtidos na etapa cinco foram comparados com os resultados de simulações de autonomia de luz natural de 300 lux para 50% do tempo, $DA_{(300,50\%)}$, sem considerar a operação de cortinas e persianas proposta pelo IES LM-83. Os resultados foram analisados a partir do tratamento dos dados obtidos nas simulações em planilhas eletrônicas e apresentados através de gráficos percentuais, demonstrando a redução na autonomia de luz natural por obstrução do entorno. Foi avaliado o eixo de pontos perpendiculares à fachada de maior extensão do

modelo de estudo direcionada para o norte, sul, leste e oeste, considerando para o pavimento superior o cenário sem obstrução e para o pavimento inferior os cenários com as obstruções 1 e 2, totalizando três análises para cada orientação. Também foi analisado o percentual do tempo que o sistema de proteção solar interno permanece fechado para cada grupo de controle das malhas paralelas às fachadas avaliadas com o enfoque para a malha central, malha à qual pertencem os pontos de análise perpendiculares às fachadas. Com isso, foi demonstrado o impacto do entorno no bloqueio da incidência direta de sol na edificação de estudo e a relação com a autonomia de luz natural. A avaliação do fechamento do sistema de proteção solar interno foi realizada através de $DA_{(1000)}$ oriunda apenas de radiação direta para cada grupo de controle, sendo analisado o percentual do tempo máximo em que, pelo menos, cinco pontos de controle apresentam essa autonomia durante o ano, métrica utilizada para o acionamento do sistema de proteção solar interno. Com o objetivo de entender o impacto da operação de cortinas apenas em função da orientação solar estudada e de compreender separadamente a influência do entorno nessa operação, serão apresentados os resultados do pavimento tipo superior, sem a presença de obstruções frontais e, na sequência, os resultados considerando as duas obstruções frontais estudadas.



CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

Resultados e Discussão

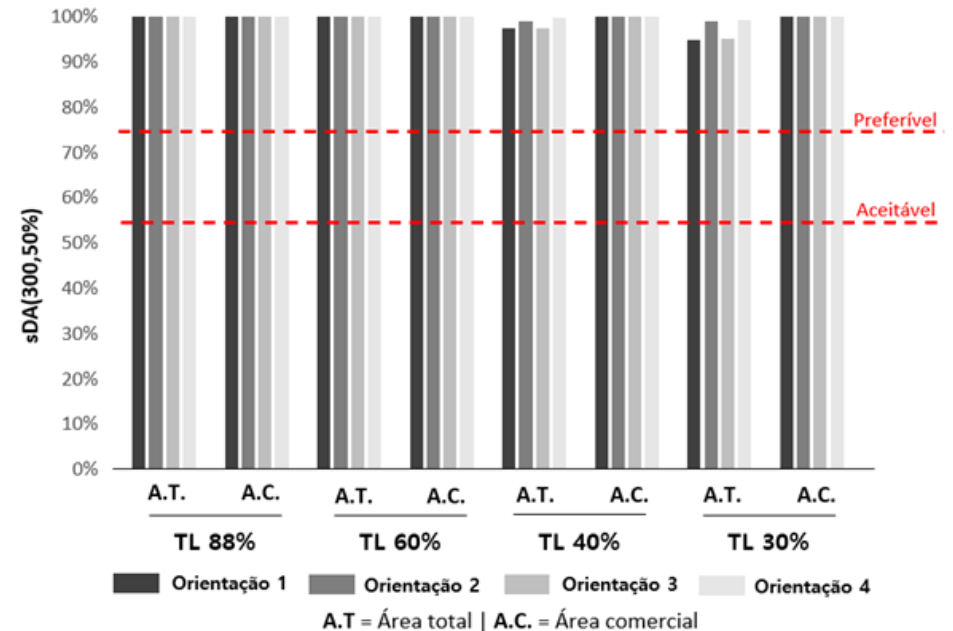
Os resultados das simulações realizadas são apresentados a seguir.

4.1 | ANÁLISE DE $sDA_{(300,50\%)}$ PARA AS DIFERENTES ORIENTAÇÕES DE QUADRA E IMPACTO DO ENTORNO

Os resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ para o pavimento superior da edificação de estudo, 15º pavimento, foi de 100% para o cenário de TL de 88% e 60% para todas as orientações de quadra consideradas, quando avaliada a área inteira do pavimento. Quando as TL de vidro foram de 40% e de 30%, os resultados ficaram próximos de 100%, sendo de 97% para as orientações 1 e 3 da quadra (eixo do edifício leste/oeste) e de 99% e de 100%, respectivamente, para as orientações 2 e 4 da quadra (eixo do edifício norte/sul). Quando avaliada apenas a área comercial do pavimento (área de piso com redução de 20%), a autonomia de 300 lux para, pelo menos, 50% do tempo de todos os cenários é de 100% da área (Figura 40).

Figura 40

Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ do pavimento tipo superior para as orientações solares das quadras e os vidros avaliados, com indicação da recomendação da IES em vermelho

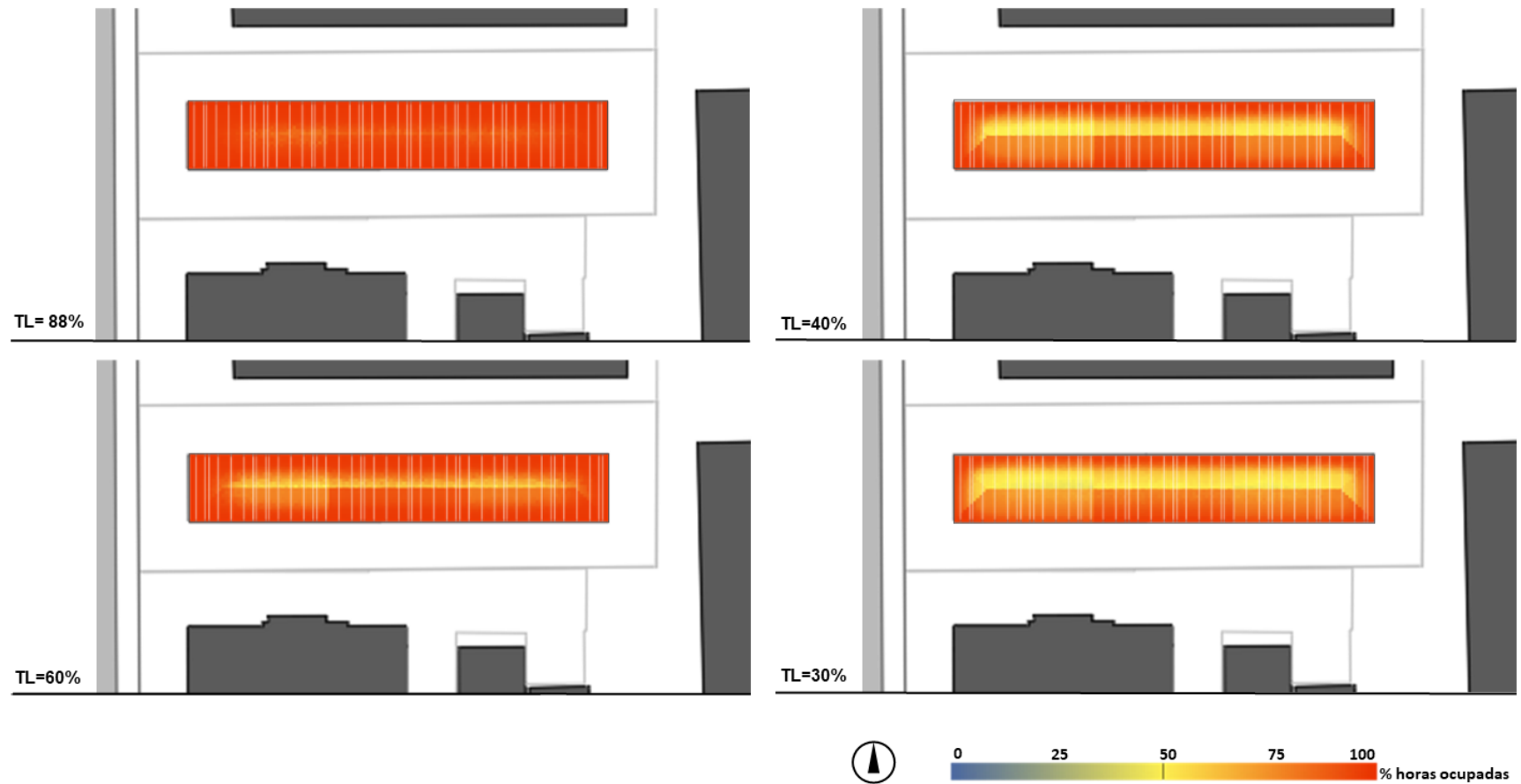


Fonte: Elaborado pela autora.

Embora praticamente 100% da área do pavimento superior apresente autonomia de 300 lux para 50% do tempo avaliado, é possível observar, nas imagens das Figuras 41, 42, 43 e 44, a redução do percentual do tempo (valores entre 50% e 100%) em que a malha de análise apresenta essa autonomia à medida que é reduzida a TL do vidro. É possível observar que a área com valores próximos de 50% com essa autonomia (em amarelo nas imagens) aumenta significativamente à medida que diminui a TL do vidro, ou seja, embora praticamente 100% da área apresente autonomia de 300 lux para 50% do tempo em todos os vidros avaliados, quando utilizam-se vidros com TL maiores, essa autonomia fica bem mais próxima de 100% do período de ocupação.

Figura 41

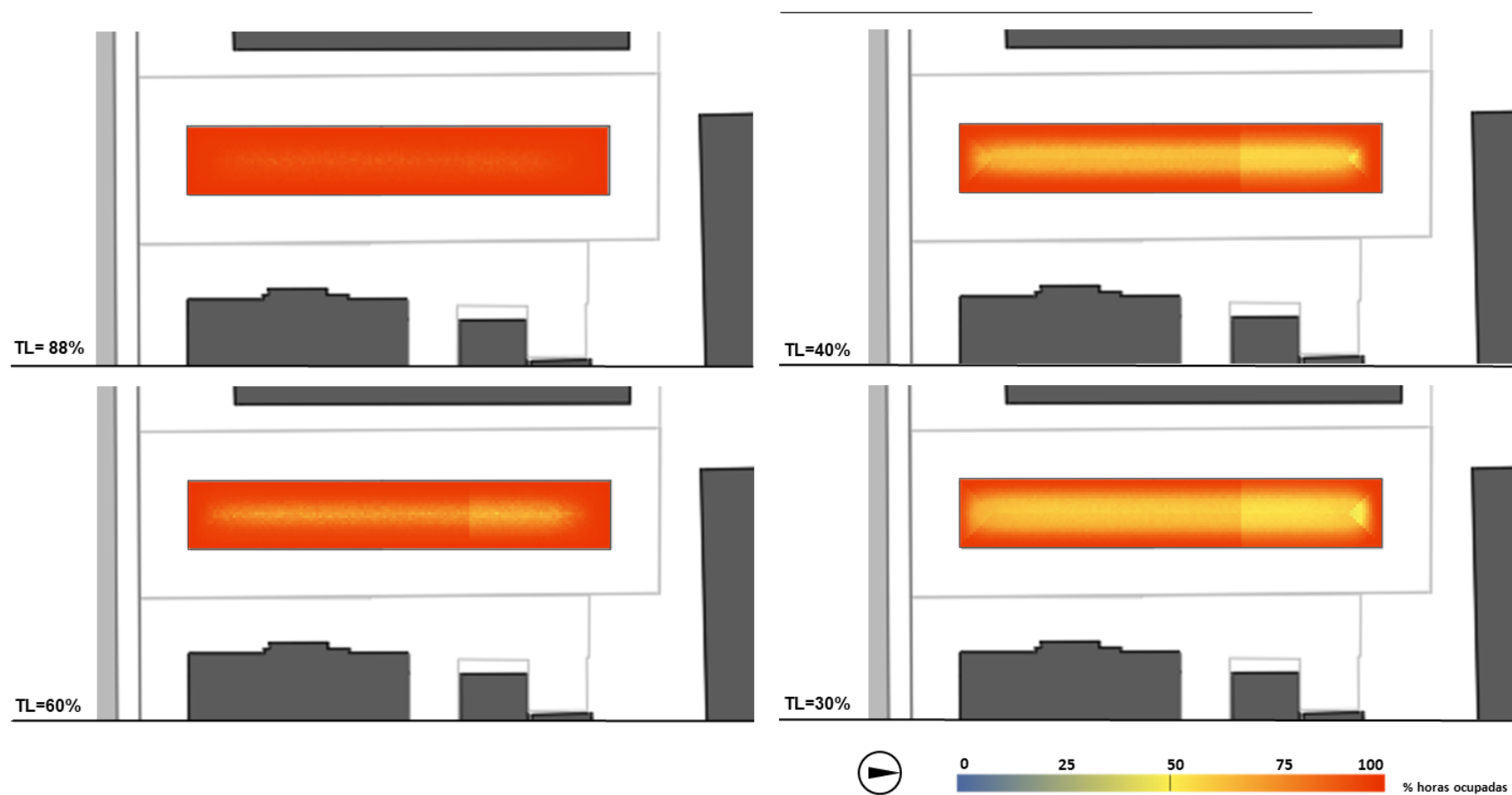
Imagens da planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 1 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 42

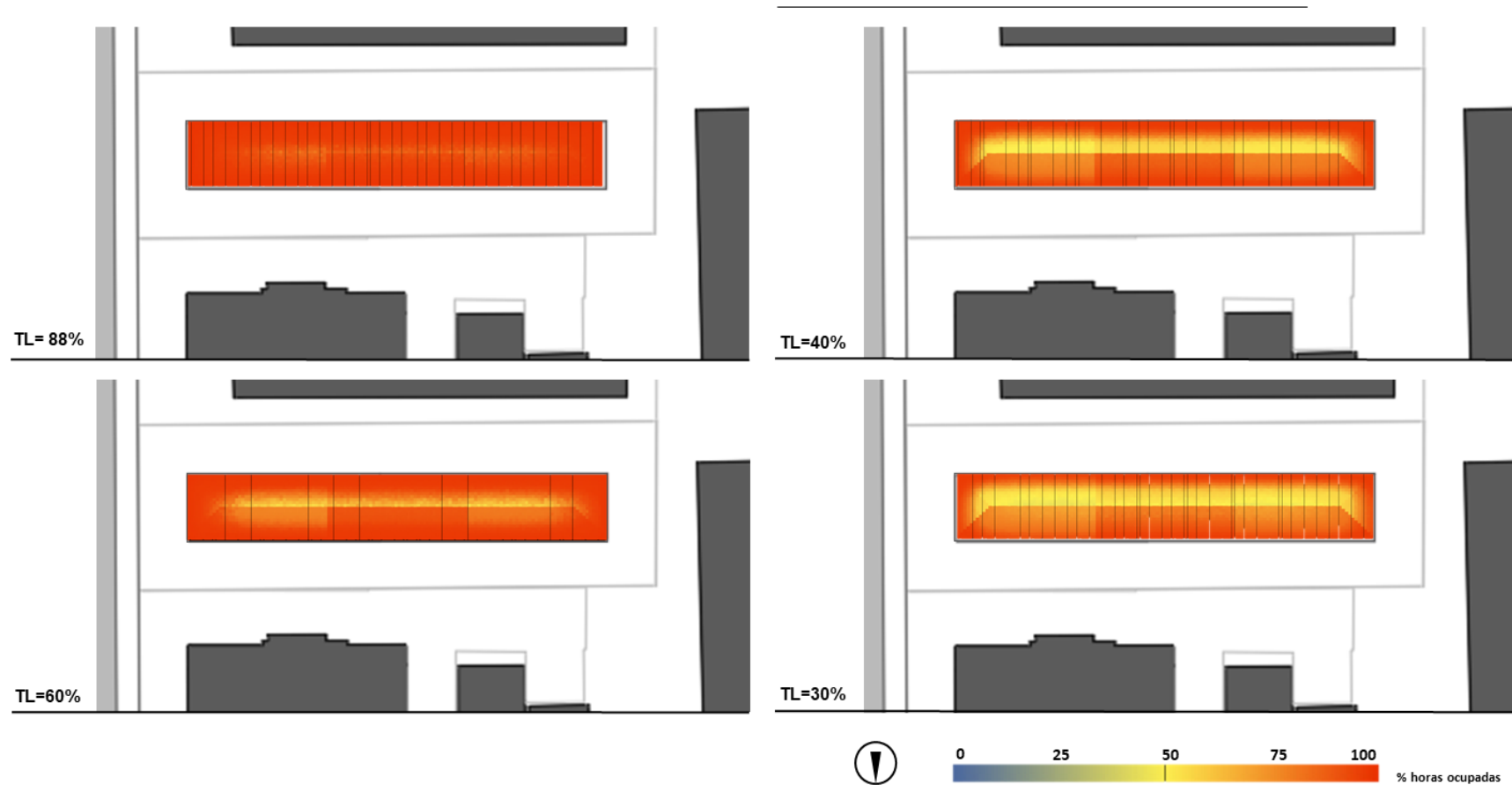
Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 2 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 43

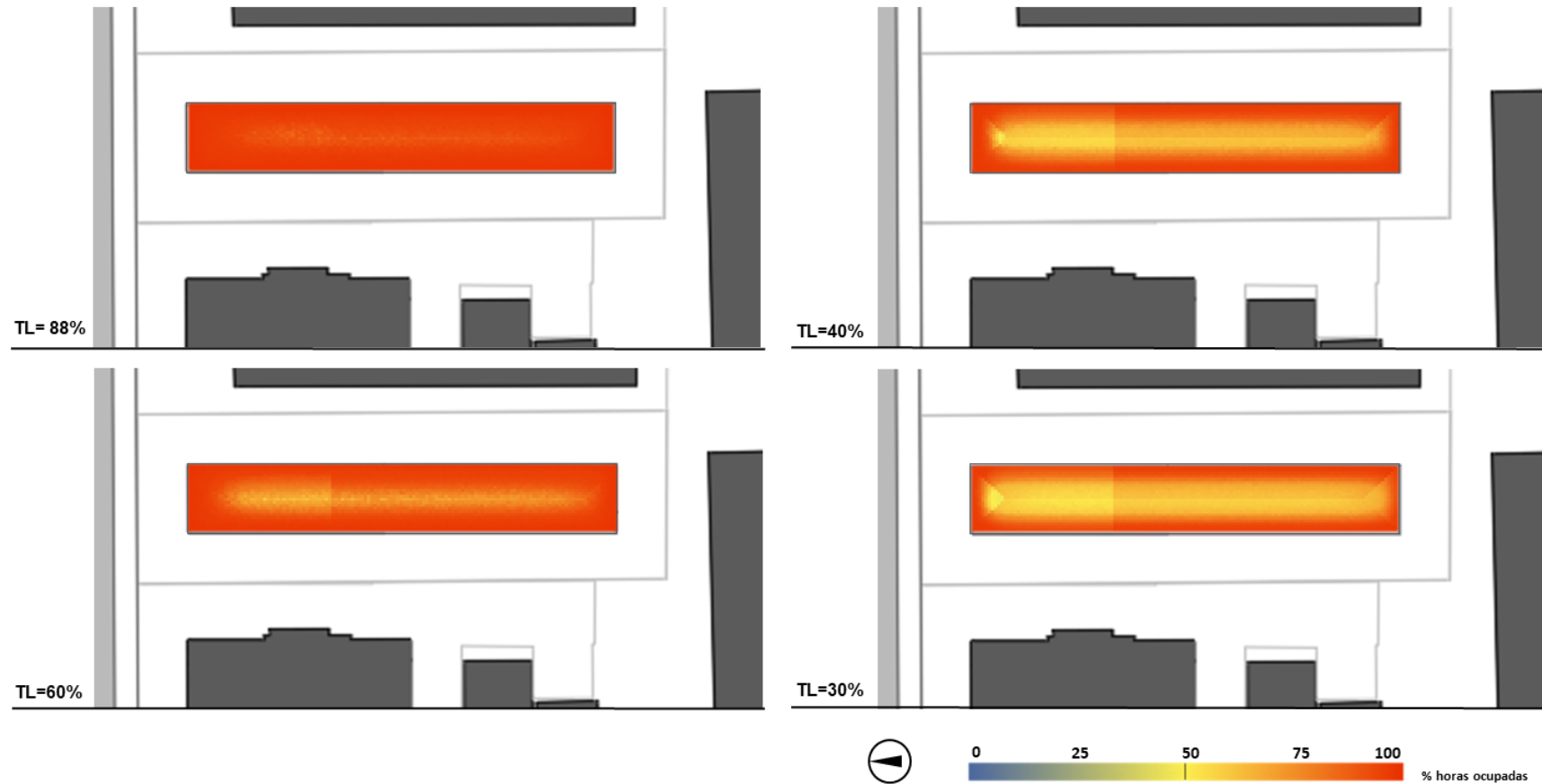
Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 3 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 44

Imagens de planta baixa do pavimento tipo superior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 4 da quadra

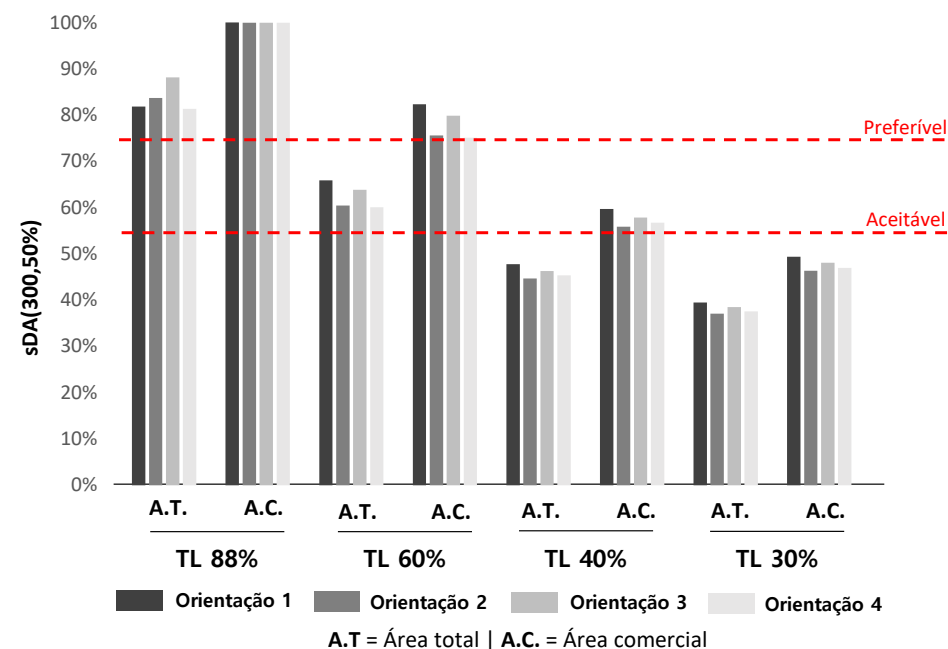


Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ para o pavimento tipo inferior da edificação de estudo, 4º pavimento da edificação, demonstram que a área total do pavimento tipo apresenta resultado superior a 75%, valor definido como preferível pela IES, apenas no cenário de vidro com TL de 88%. O cenário de TL de 60% apresenta resultados em torno de 60% (para as orientações 2 e 4 da quadra) e, em torno de 65%, para as orientações 1 e 3 da quadra. Para o cenário de TL de 40%, os valores ficam em torno de 45% (para as orientações 2 e 4 da quadra) e de 47% (para as orientações 1 e 3 da quadra). Quando considerada a TL de 30%, os resultados ficam em torno de 38% para todas as orientações estudadas. No que diz respeito à área comercial do pavimento (área de piso com redução de 20%), os cenários de vidro com TL de 88% e 60% apresentam resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ superiores a 75%, sendo que, nas orientações solares 2 e 4, o resultado fica próximo desse valor. Para a TL de 40%, o resultado de $sDA_{(300,50\%)}$ fica entre 55% e 59% e, para a TL de 30%, entre 46% e 49% (Figura 45).

Figura 45

Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ do pavimento tipo inferior para as orientações solares das quadras e vidros avaliados, com indicação da recomendação da IES em vermelho



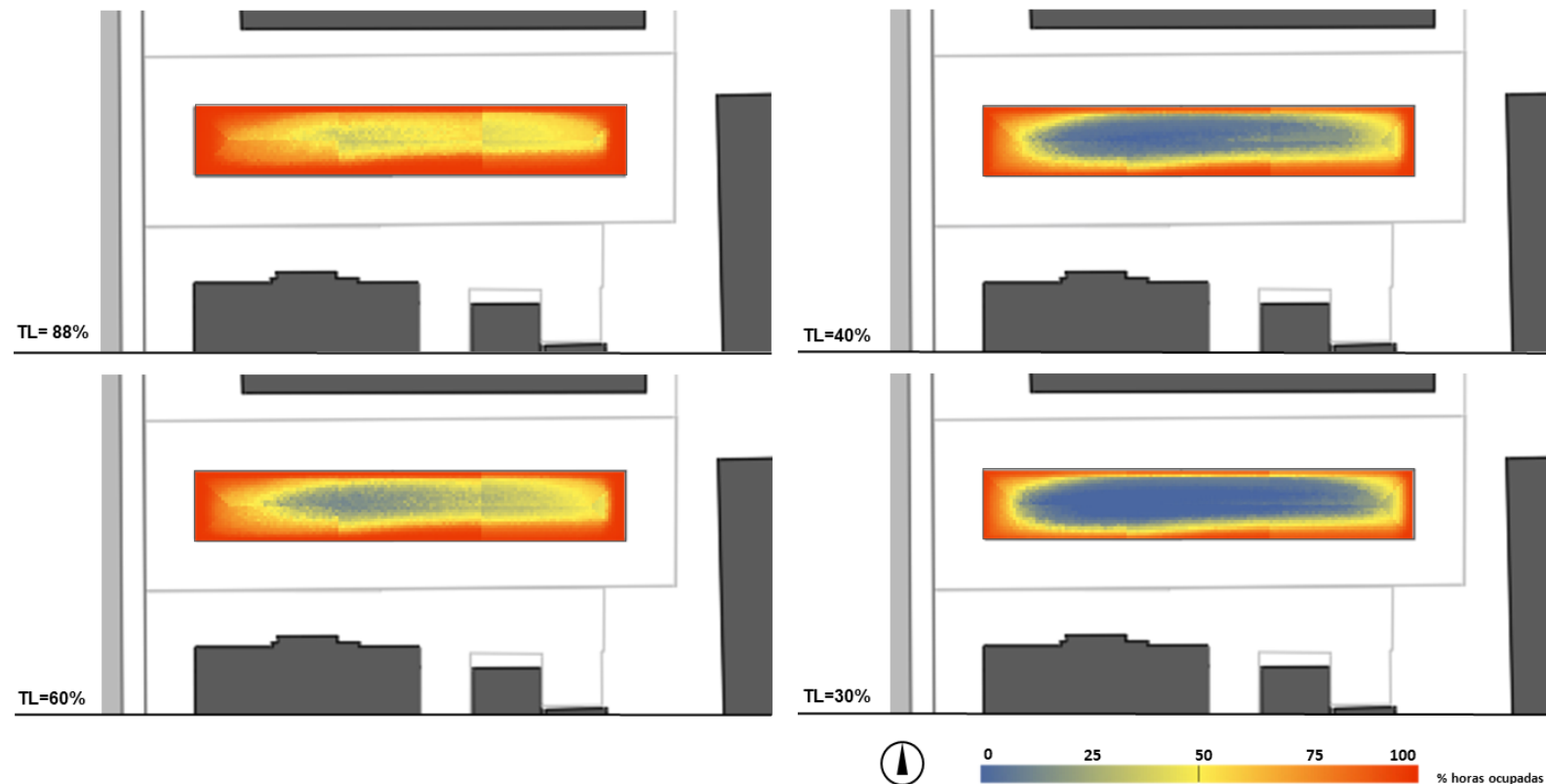
Fonte: Elaborado pela autora.

Conforme os resultados, para a área comercial do pavimento tipo inferior da edificação de estudo atender ao requisito preferível pela IES, é necessário utilizar vidros com TL de, no mínimo, 60% e, para atender ao requisito aceitável, é necessária a utilização de vidros com TL de, pelo menos, 40% para as qua-

tro orientações de quadra consideradas. No entanto, o resultado fica bem próximo do limite definido pela IES como aceitável com a utilização de vidros com TL de 40%. As imagens das Figuras 46, 47, 48 e 49 demonstram o percentual do tempo com autonomia de 300 lux no pavimento para as TL de vidros avaliadas.

Figura 46

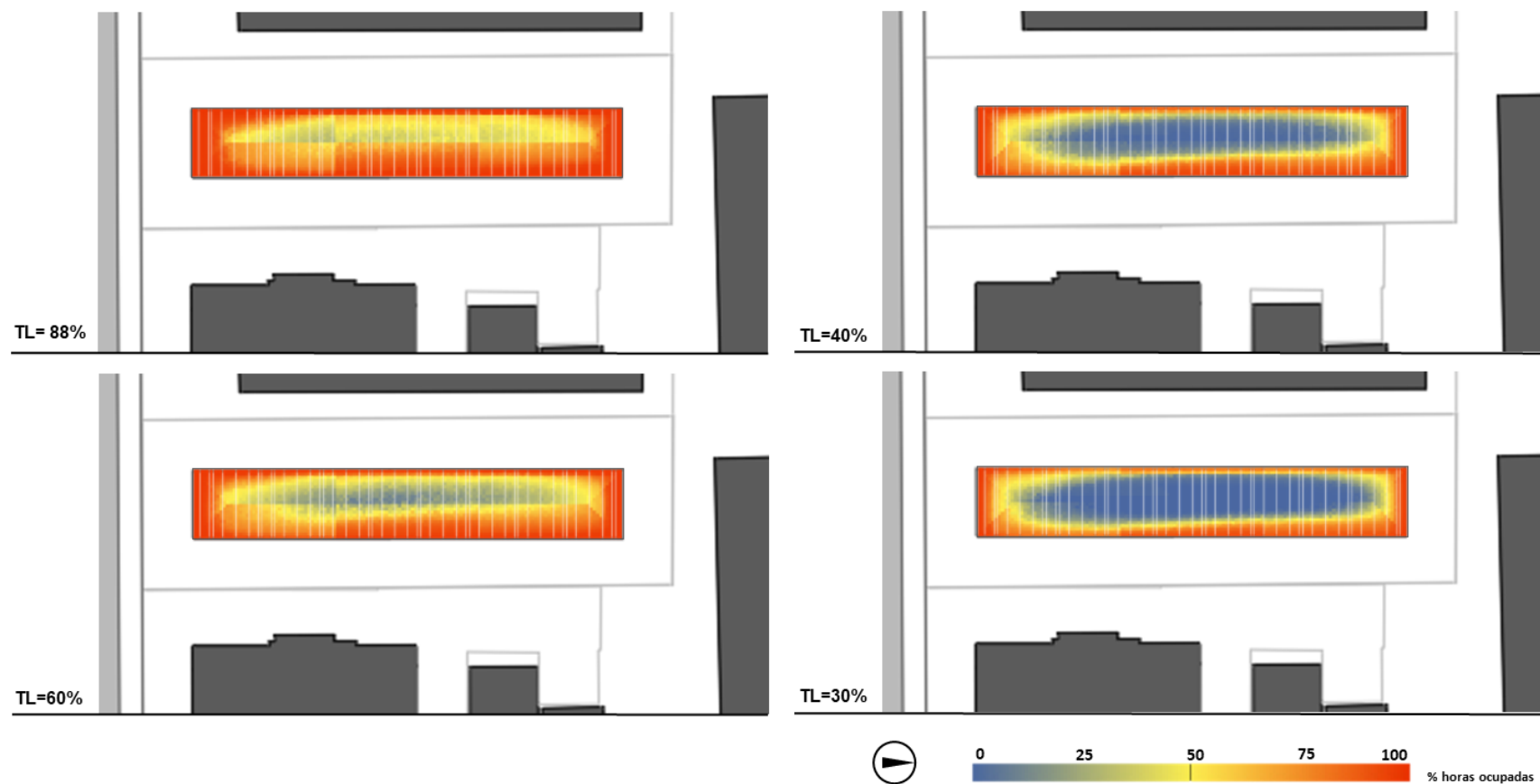
Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 1 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 47

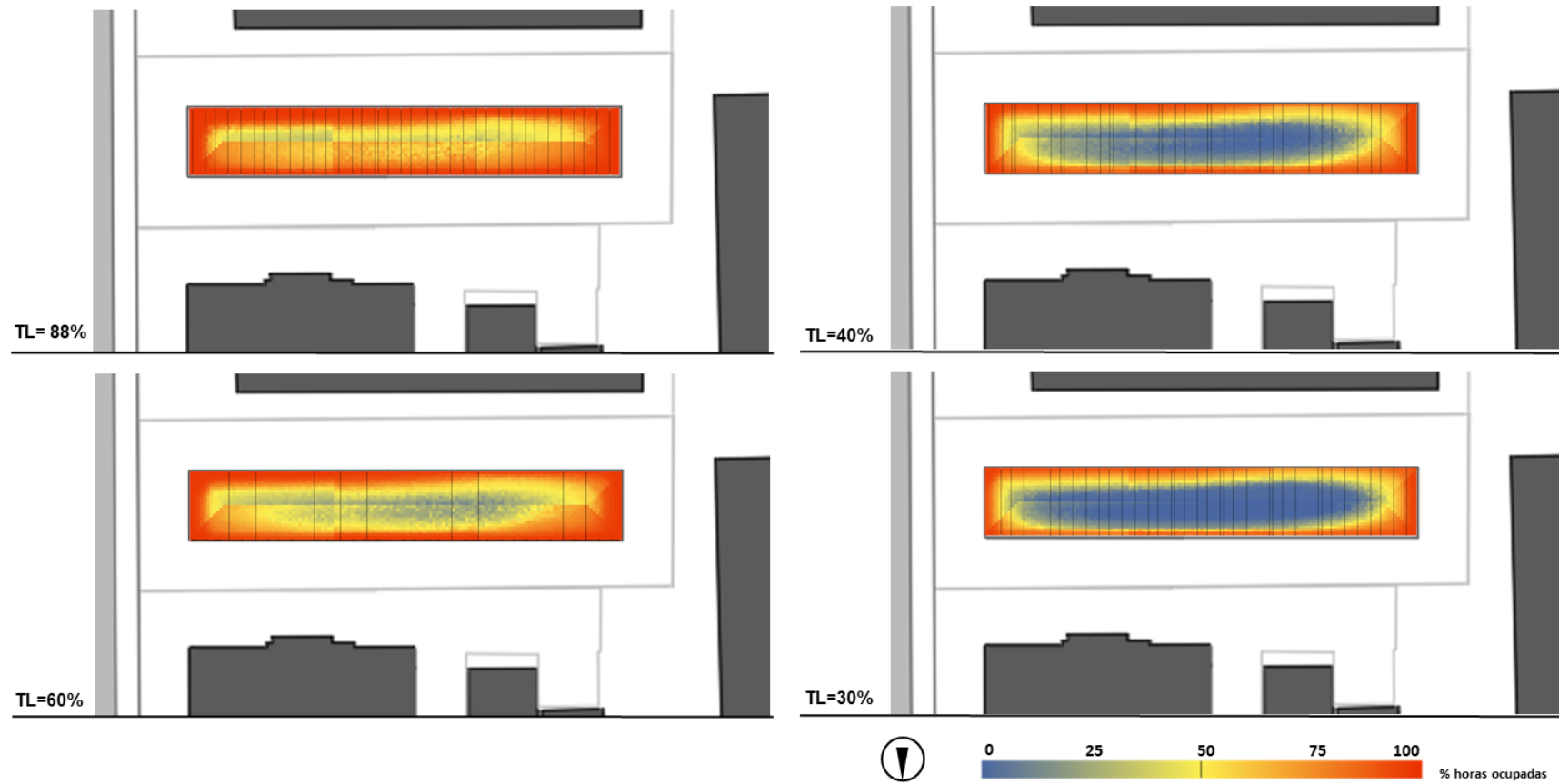
Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 2 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48

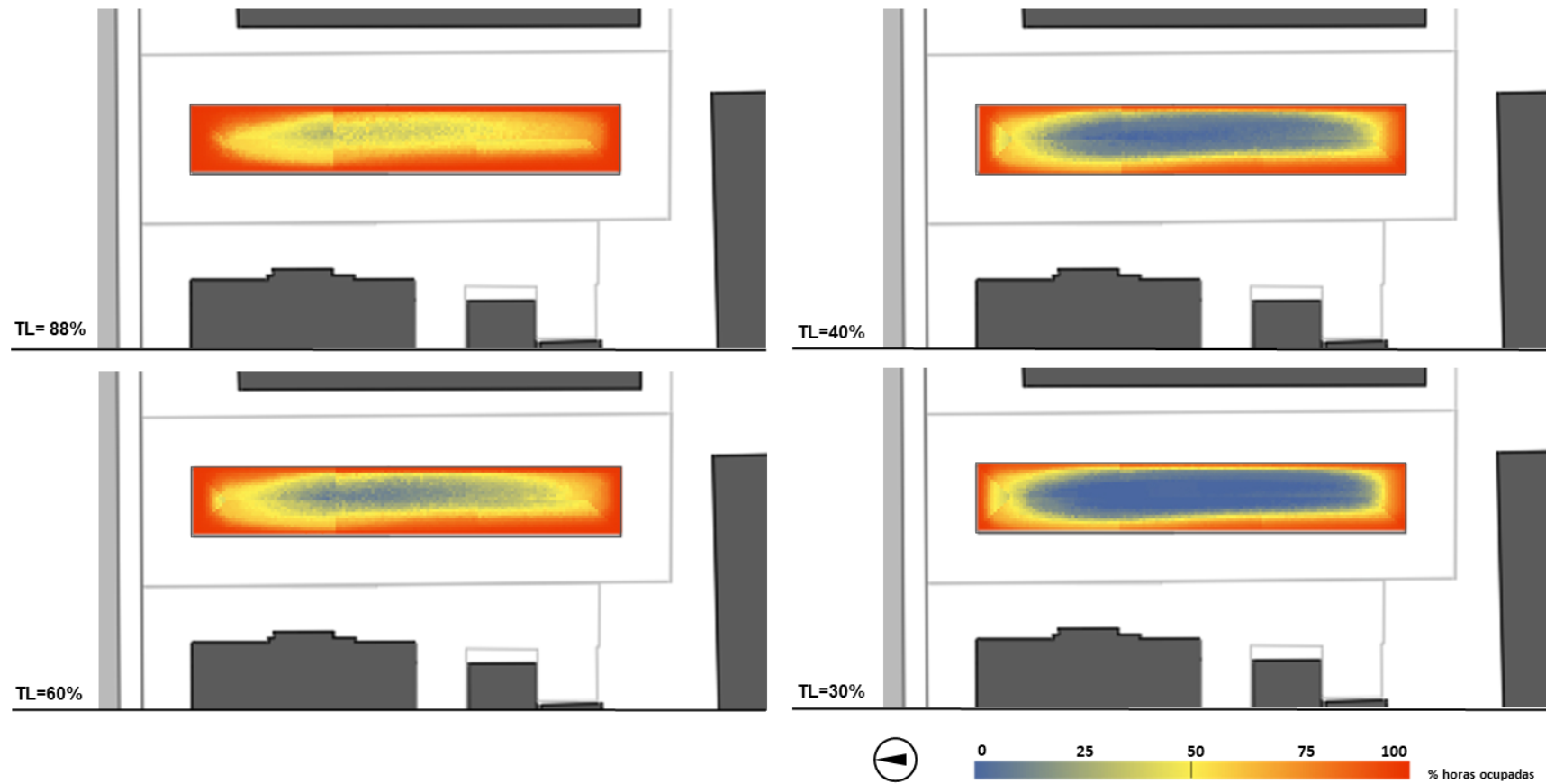
Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 3 da quadra



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 49

Imagens da planta baixa do pavimento tipo inferior indicando os resultados de $DA_{(300)}$ dos cenários de vidros avaliados com a orientação 4 da quadra

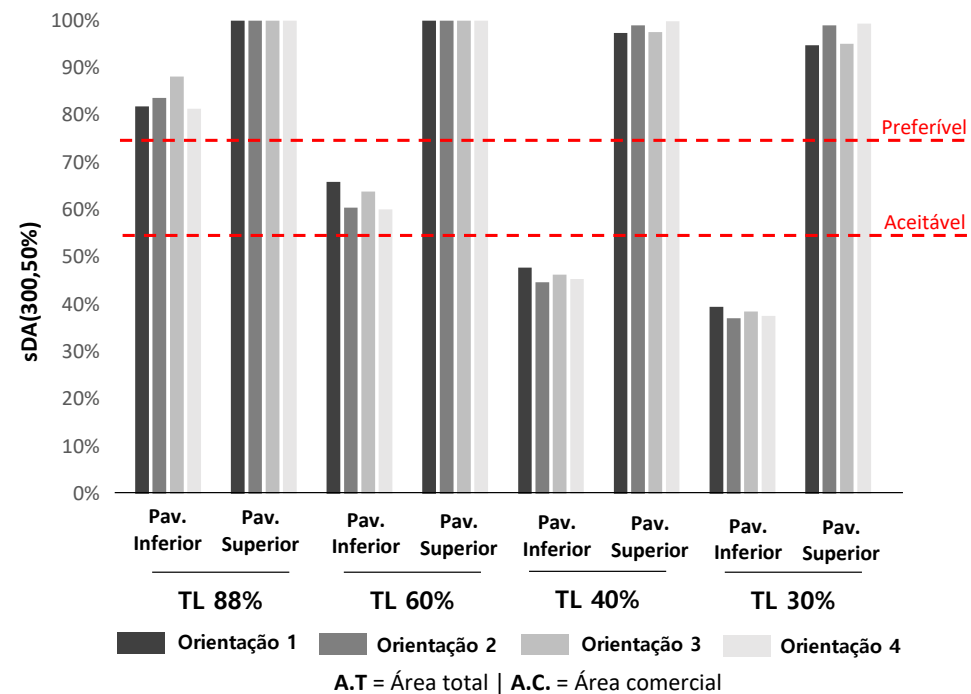


Fonte: Elaborado pela autora.

As imagens de cores falsas de $DA_{(300)}$ do pavimento tipo superior da edificação de estudo (Figuras 41, 42, 43 e 44), quando comparadas com as imagens do modelo do pavimento tipo inferior da edificação (Figuras 46, 47, 48 e 49), demonstram o impacto do entorno na autonomia de 300 lux no área do pavimento. Uma vez que a área total do pavimento tipo superior da edificação apresentou todos os cenários estudados com 100% da área com $DA_{(300,50\%)}$, é possível concluir que o entorno avaliado apresentou redução nos resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ na área total do pavimento tipo inferior de, pelo menos, 18%, 34%, 50% e 55%, respectivamente para as TL de vidro de 88%, 60%, 40% e 30% na orientação solar 1 de quadra; de, respectivamente, 16%, 40%, 54% e 62% para a orientação solar 2 de quadra; de 12%, 36%, 51% e 57% para a orientação solar 3 de quadra; e de 19%, 40%, 55% e 62% para a orientação solar 4 de quadra, quando considerada a área total do pavimento (Figura 50).

Figura 50

Valores de $sDA_{(300,50\%)}$ para a área total do pavimento tipo inferior e do pavimento tipo superior do modelo de estudo de acordo com a TL do vidro e com a orientação solar de quadra, com indicação da recomendação da IES em vermelho



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados demonstram que, à medida que é reduzida a TL do vidro, há uma maior influência do entorno nos resultados, com reduções nos valores de $sDA_{(300,50\%)}$ mais significativas. Isso porque a presença do entorno acarreta em uma grande redução da luz natural que chega no pavimento tipo inferior do modelo de estudo. Essa luz, ao passar por um vidro com baixa TL, é reduzida ainda mais, de modo que não é obtida uma iluminância de 300 lux no interior do pavimento. O entorno considerado para as quatro orientações solares de quadra avaliadas proporciona redução nos resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ entre 12% e 19%, quando considerada a TL de vidro de 88% e, entre 55% e 62%, quando a TL de vidro é igual a 30%. A utilização de vidros com a TL luminosa de 40% e de 30% acarreta uma redução na área com autonomia de $DA_{(300,50\%)}$ de, pelo menos, 50% para todas as orientações de quadra avaliadas. A TL de vidro de 60% proporciona essa redução entre 34% e 40%. Com isso, a área total do pavimento tipo inferior do modelo de estudo atendeu ao requisito definido como aceitável pelo IES apenas nos cenários de vidros com TL de 88% e de 60%. As quatro orientações de quadra exibiram resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ similares, com diferença de, no máximo, 6% entre as orientações avaliadas quando considerada a área total do pavimento tipo.

4.2 | ANÁLISE DA RELAÇÃO ENTRE PROFUNDIDADE DO AMBIENTE, TRANSMITÂNCIA LUMINOSA DO VIDRO E ENTORNO PARA AS ORIENTAÇÕES SOLARES AVALIADAS

Quando observados os resultados dos pontos de avaliação do pavimento tipo superior da edificação de estudo, cenário sem influência do entorno, todos os pontos perpendiculares às quatro orientações solares estudadas apresentaram autonomia de 300 lux para 50% do tempo em todos os cenários de TL de vidro estudados. No entanto, o último ponto de avaliação (4,95 m de distância em relação à fachada) dos cenários de TL de 40% e 30% apresenta resultados próximos do limite de 50%, sendo de 56% e 54% quando considerada a orientação solar norte; de 68% e 62%, quando considerada a orientação leste; e de 63% e 60%, quando considerada a orientação oeste. Na orientação sul, mesmo com a utilização de vidros com TL de 40% e de 30%, foi evidenciado, em todos os pontos, mais de 80% do tempo com autonomia de 300 lux. É importante salientar a diferença no percentual do tempo de autonomia de 300 lux para as diferentes TL de vidro estudadas, pois, no cenário de avaliação de vidro com TL de 88%, todos os pontos

avaliados apresentam valores de $DA_{(300)}$ superior a 90% para as quatro orientações estudadas.

Tendo em vista que todos os pontos avaliados do pavimento superior atenderam à $sDA_{(300,50\%)}$, não foi possível identificar uma limitação de profundidade para ambientes inseridos nesse pavimento. No entanto, de acordo com esses resultados, pode-se concluir que, para atender ao requisito definido como aceitável pela IES, $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$, é possível a configuração de ambientes direcionados para as orientações norte, leste e oeste no modelo de estudo, se não forem impactadas pela presença de obstruções vizinhas, com profundidade de, pelo menos, 9 m, quando consideradas todas as TL de vidro. No entanto ambientes direcionados para o norte apresentam maiores restrições de profundidade quando comparados com aqueles orientados para leste e oeste, uma vez que o resultado do último ponto de avaliação (ponto 4,95 m) apresentou resultados mais próximos do limite da premissa de avaliação nos cenários de TL de 40% e de 30%. Como os ambientes direcionados para o sul apresentam como resultado do último ponto valores acima de 80%, é possível concluir que poderiam ser configurados ambientes com profundidade superior a 9 m. Com isso, a orientação que permite a configuração de um ambiente no modelo de estudo

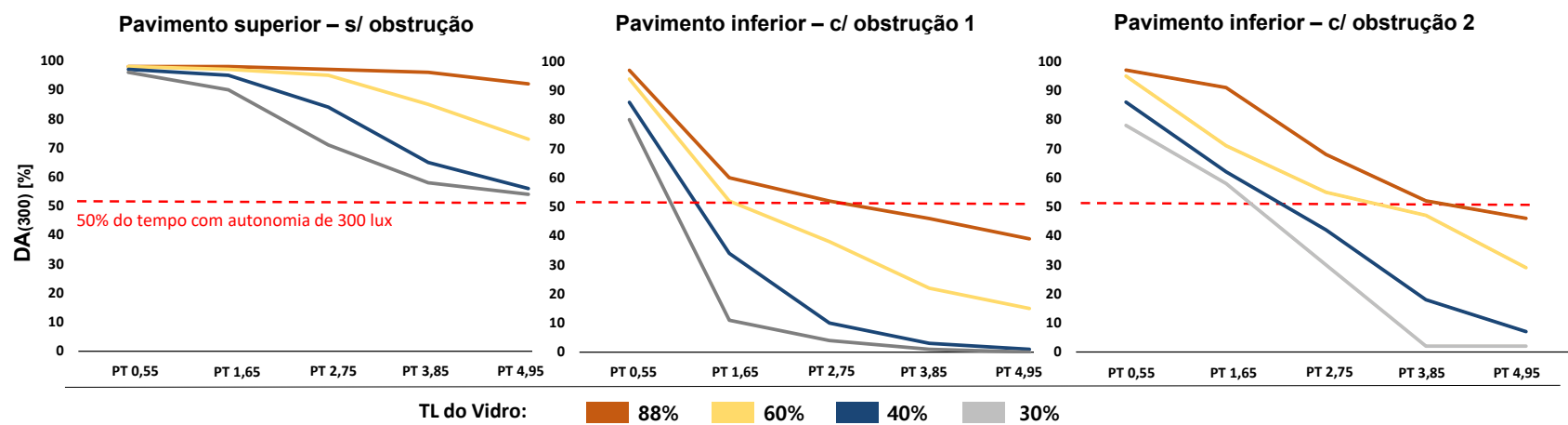
com maior distância em relação à fachada, a fim de atender aos requisitos da IES, é a orientação sul e, por último, a orientação norte. Para atendimento do requisito definido como preferível pela IES, $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$, é possível a configuração de ambientes direcionados para o norte, o leste e o oeste com distância em relação à fachada de, pelo menos, 6,60 m, sendo possível profundidades maiores para os ambientes direcionados apenas para o sul.

Se observados os resultados dos pontos de avaliação do pavimento tipo inferior da edificação de estudo, considerando-se as obstruções frontais 1 e 2, os resultados mudam bastante e serão apresentados de acordo com as orientações solares estudadas.

Orientação norte: Os resultados de autonomia de 300 lux são atendidos em, pelo menos, 50% do tempo no pavimento tipo inferior da edificação de estudo, considerando a obstrução frontal 1, apenas nos três primeiros pontos de avaliação (2,75 m de distância em relação à fachada), para os cenários de TL de vidro de 88%; e apenas para os dois primeiros pontos (1,65 m de distância em relação à fachada), no cenário de TL de 60%, sendo que o resultado do ponto 1,65 m fica no limite desse valor, 52%. Nos cenários em que a TL é de 40% e de 30%, embora o ponto 0,55 m apresente valores superiores a 50%, ponto 1,10 m já apresenta valores bem inferiores, 34% e 11%, para os mesmos cenários de TL. Quando são observados os resultados que consideram a obstrução frontal 2, o resultado de autonomia de 300 lux é atendido em, pelo menos, 50% do tempo para os três primeiros pontos de avaliação (2,75 m) nos cenários de TL de vidro de 88% e de 60%. Quando consideradas as TL de 40% e de 30%, apenas os dois primeiros pontos (1,65 m de distância em relação à fachada) apresentam iluminação 300 lux para 50% do tempo. Os pontos de avaliação, se considerada a obstrução frontal 2, apresentam maior percentual do tempo com autonomia de 300 lux quando comparados com os resultados oriundos da análise com a presença da obstrução 1, sendo possível observar, nos gráficos da Figura 51, o impacto do entorno e da TL dos vidros na autonomia de 300 lux dos pontos avaliados.

Figura 51

Orientação norte: resultados de $DA_{(300)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

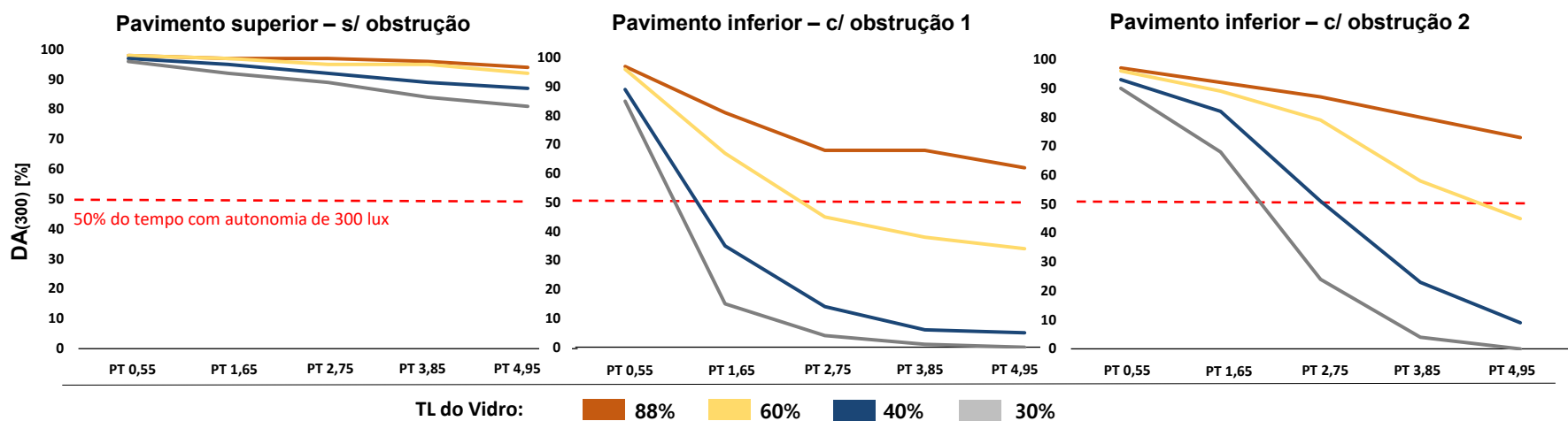


Fonte: Elaborado pela autora.

Orientação sul: Quando são avaliados os pontos de análise perpendiculares a esta fachada do pavimento tipo inferior, considerando a presença da obstrução frontal 1, os resultados de $DA_{(300)}$ são superiores a 50% para todos os pontos avaliados apenas quando considerada a utilização de um vidro com TL de 88%. Com essa obstrução, esse percentual é atendido até o ponto 1,65 m no cenário de vidro com TL de 60% e apenas no ponto 0,55 m no cenário de vidro com TL de 40% e 30%. No que diz respeito à avaliação dos pontos de análise considerando a obstrução frontal 2, os resultados de $DA_{(300)}$ também são superiores a 50% para todos os pontos avaliados apenas quando considerada a utilização de um vidro com TL de 88% e, até o ponto 3,85 m, no cenário de vidro com TL de 60%. Já no cenário com vidro cuja TL é de 40% e 30%, a autonomia de 300 lux para 50% do tempo é atendida até o ponto 2,75 m e até o ponto 1,65 m, respectivamente. Os pontos de avaliação, na presença da obstrução frontal 2, apresentam maior percentual do tempo com autonomia de 300 lux, se confrontados com os resultados oriundos da análise com a presença da obstrução 1, sendo possível perceber, nos gráficos da Figura 52, o impacto do entorno e da TL dos vidros na autonomia de 300 lux nos pontos avaliados.

Figura 52

Orientação sul: resultados de $DA_{(300)}$ para diferentes TL de vidro e condições de entorno para os pontos de avaliação, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

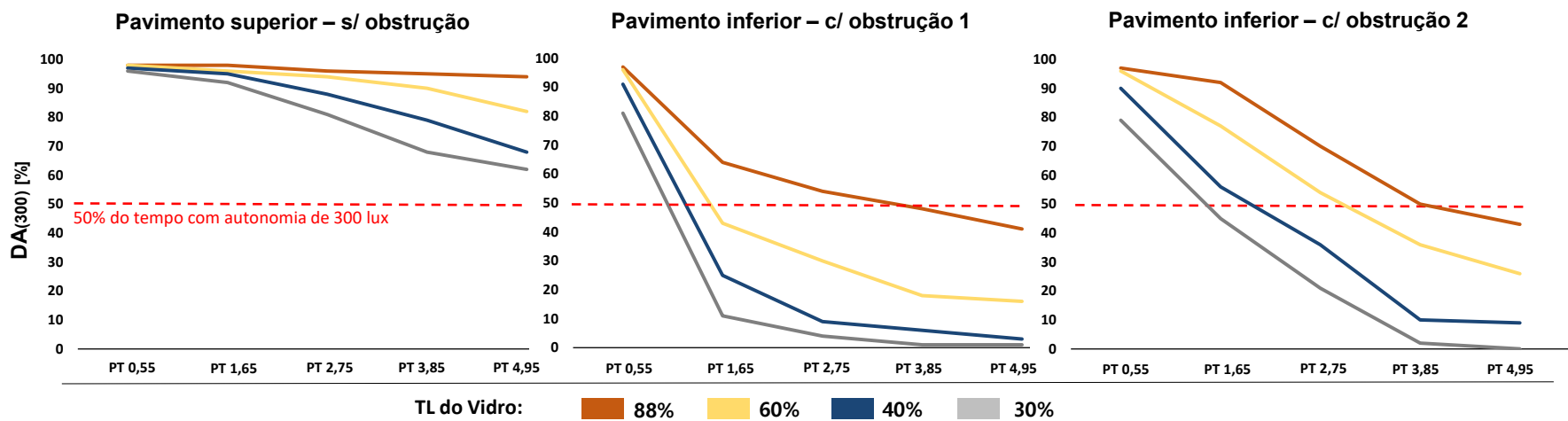


Fonte: Elaborado pela autora.

Orientação leste: Ao se avaliar os pontos de análise perpendiculares a esta fachada do pavimento tipo inferior da edificação de estudo na presença da obstrução frontal 1, os resultados de autonomia de $DA_{(300)}$ são superiores a 50% para os três primeiros pontos (2,75 m) no cenário de TL de 88% e apenas no ponto 0,55 m quando considerado um vidro com TL de 60%, 40% e 30%; o ponto 1,65 m, apresenta resultados de 43%, 25% e 11%, respectivamente. Na presença da obstrução frontal 2, os resultados de autonomia de $DA_{(300)}$ são valores superiores a 50% até o ponto 3,85m no cenário de TL de 88%, e até o ponto 2,75 m no cenário de TL 60%, sendo que este último está próximo do limite, que o resultado é de 54%. No caso de vidros com TL de 40% e 30%, o resultado de $DA_{(300)}$ é superior a 50% apenas até o ponto 1,65 m e o ponto 0,55 m, respectivamente. Os pontos de avaliação, na presença da obstrução frontal 2, apresentam maior percentual do tempo com autonomia de 300 lux, se comparados com os resultados obtidos a partir da análise com a presença da obstrução 1, sendo possível notar, nos gráficos da Figura 53, o impacto do entorno e da TL dos vidros na autonomia de 300 lux nos pontos avaliados.

Figura 53

Orientação leste: resultados de $DA_{(300,50\%)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

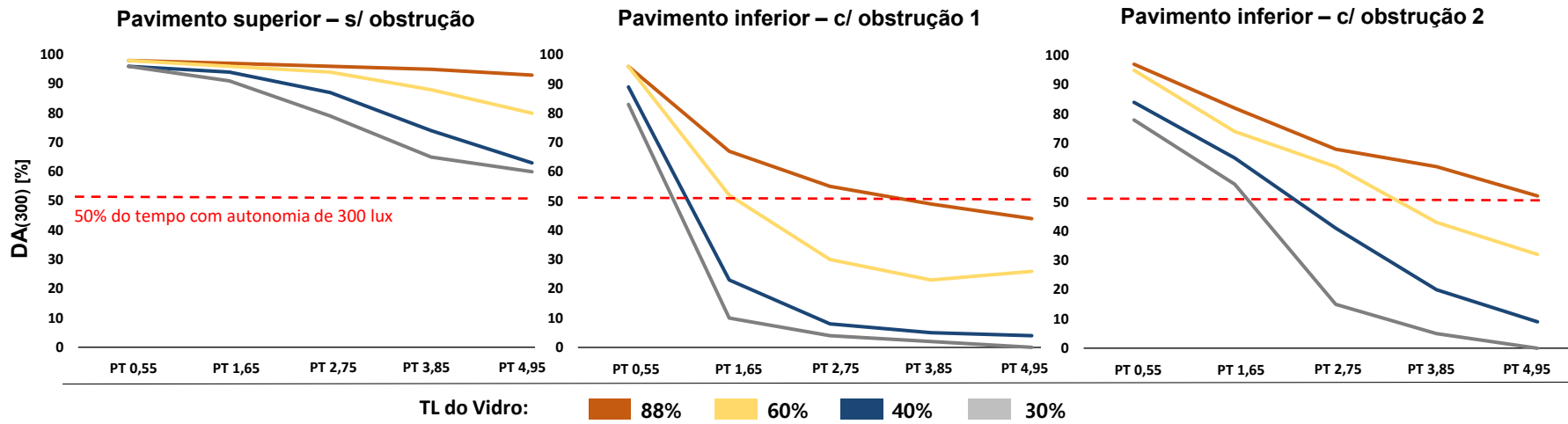


Fonte: Elaborado pela autora.

Orientação oeste: Quando avaliamos os pontos de análise perpendiculares a esta fachada do pavimento tipo inferior da edificação de estudo considerando a presença da obstrução frontal 1, os valores de $DA_{(300)}$ são superiores a 50% até o ponto 2,75 m no cenário de vidro com TL de 88%, e até o ponto 1,65 m no cenário de vidro com TL de 60%. Nos cenários de vidro com TL de 40% e 30%, esse valor é atendido apenas para o ponto 0,55 m. Na presença da obstrução frontal 2, os valores de $DA_{(300)}$ são superiores a 50% em todos os pontos de análise no cenário de vidro com TL de 88%, e até o ponto 2,75 m no cenário de vidro com TL de 60%. Nos cenários de vidro com TL de 40% e 30%, esse valor é atendido até o ponto 1,65 m. Os pontos de avaliação, se considerada a presença da obstrução frontal 2, apresentam maior percentual do tempo com autonomia de 300 lux, se comparados com os resultados oriundos da análise com a presença da obstrução 1, sendo possível observar, nos gráficos da Figura 54, o impacto do entorno e da TL dos vidros na autonomia de 300 lux nos pontos avaliados.

Figura 54

Orientação oeste: resultados de $DA_{(300,50\%)}$ para diferentes TL de vidro e profundidades do ambiente, com a identificação em vermelho do limite de 50% do tempo



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando avaliado o limite de profundidade de ambientes do pavimento tipo inferior da edificação de estudo para as quatro orientações estudadas e para as duas condições de entorno avaliadas neste trabalho, os valores de distância máxima para atendimento do requisito aceitável da IES podem ser observados nas Tabelas 3 e 4. Essas distâncias são estimadas considerando a distância do último ponto com atendimento acrescida de 45% dessa distância, de modo que, pelo menos, 55% dos pontos do eixo em relação à fachada atendam ao requisito.

Tabela 3 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1

	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	5 m	3 m	1 m	1 m
Sul	9 m ²⁷	3 m	1 m	1 m
Leste	5 m	1 m	1 m	1 m
Oeste	5 m	3 m	1 m	1 m

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 4 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2

	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	7 m	5 m	3 m	3 m
Sul	9 m ²⁷	7 m	5 m	3 m
Leste	7 m	5 m	3 m	1 m
Oeste	9 m ²⁷	5 m	3 m	3 m

Fonte: Elaborado pela autora.

²⁷ Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.

Segundo os resultados, é possível concluir que a configuração de ambientes no pavimento tipo inferior do modelo de estudo na presença da **obstrução frontal 1** apresenta grande restrição de profundidade: um limite de 3 m, quando considerado um vidro com TL de 60 % para ambientes direcionados para o norte, sul e oeste e de 1 m quando direcionado para o leste, de modo a atender ao requisito definido como aceitável pela IES. Ambientes com profundidades de, pelo menos, 5 m seriam viabilizados apenas com o emprego de vidro com TL de 88%, quando direcionados para o norte, leste e oeste e de, pelo menos, 9 m para ambientes direcionados para o sul. No entanto, vidros com propriedades térmicas que são comumente utilizados em fachadas de vidro na cidade de Porto Alegre por questões não só de eficiência, mas também de conforto, não apresentam essa característica de transmitância luminosa. Logo, evidenciou-se dificuldade de atendimento do requisito definido como o mínimo aceitável pela IES em ambientes direcionados para norte, leste e oeste na presença da obstrução frontal 1.

Na presença da **obstrução frontal 2**, a configuração de ambientes com maior profundidade de modo a atender $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ já é viabilizada com a utilização de vidros com TL de 60%, sendo a distância limite em relação à fachada de,

pelo menos, 5 m para as orientações norte, leste e oeste, e de 7 m para a orientação sul. Embora os resultados dos pontos perpendiculares às orientações leste e oeste tenham demonstrado ser similares (os resultados da orientação leste correspondem a valores um pouco superiores quando não considerada a presença de obstruções), na presença da obstrução 2 os resultados foram diferentes. Os pontos de avaliação perpendiculares à fachada oeste apresentaram atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ para um ponto mais distante da fachada do que os pontos de avaliação perpendiculares à fachada leste. Com isso, na presença dessa obstrução, a fachada oeste apresentou possibilidade de configuração de ambientes com maior profundidade se comparada à fachada leste no cenário de vidros com TL de 88%. A principal diferença entre as duas configurações de quadra é que, quando avaliada a orientação leste, o volume mais representativo da obstrução 2 está localizado ao sul do eixo de avaliação e, quando avaliada a orientação oeste, esta volumetria está localizada ao norte do eixo de avaliação e, como verificado anteriormente, a orientação norte é a que proporciona os menores valores de $DA_{(300)}$ e a orientação sul é aquela que proporciona os maiores resultados de acordo com o método de avaliação deste trabalho, o que interfere no resultado dessas orientações na presença de tais obstruções.

Fica evidente a necessidade de diferença na materialidade da arquitetura a fim de responder às demandas de qualidade e de eficiência não só em relação às fachadas, mas também em relação à verticalidade da edificação de forma que a arquitetura possa responder e atender a critérios de qualidade em todos os pavimentos da edificação. Além disso, os resultados demonstraram a necessidade de utilização de estratégias arquitetônicas, como o emprego de proteções solares, de prateleira de luz e de pés-direitos maiores, com o objetivo de proporcionar maior iluminação natural no interior dos ambientes na presença da obstrução 1.

De acordo com os resultados obtidos nos pontos de avaliação, as distâncias máximas estimadas para a configuração de ambientes a fim de atender ao requisito de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ podem ser observadas nas Tabelas 5 e 6²⁸. Essas distâncias são estimadas considerando a distância do último ponto com atendimento acrescida de 25% dessa distância, de modo que, pelo menos, 75% dos pontos do eixo em relação à fachada atendam ao requisito.

Tabela 5 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1

	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	3,67 m	2,20 m	-	-
Sul	6,60 m ²⁹	2,20 m	-	-
Leste	3,67 m	2,20 m	-	-
Oeste	3,67 m	2,20 m	-	-

Fonte: Elaborada pela autora.

²⁸ Distâncias obtidas inferiores a 1 m não foram consideradas nas tabelas.

²⁹ Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.

Tabela 6 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2

	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	5,13 m	3,67 m	2,20 m	2,20 m
Sul	6,60 m ²⁹	5,13 m	3,67 m	2,20 m
Leste	5,13 m	3,67 m	2,20 m	-
Oeste	6,60 m ²⁹	3,67 m	2,20 m	2,20 m

Fonte: Elaborada pela autora.

Ao ser avaliado o requisito definido como preferível pela IES ($sDA_{(300,50\%)} > 75\%$), considerando a presença da **obstrução 1**, o estudo evidenciou muita dificuldade de atendimento desse critério, sendo viável a configuração de ambientes de modo a atendê-lo apenas para a orientação solar sul, com restrição de

profundidade de 6,60 m quando empregado vidro com TL de 88% e de 2,20 m com vidros com TL de 60%. As demais orientações, na presença dessa obstrução, apresentam restrição na profundidade de ambientes de 3,67 m mesmo com a utilização de vidros com TL de 88%, passando para 2,20 m empregando vidro com TL de 60%, distância essa que já inviabiliza a configuração de ambientes.

A presença da **obstrução solar 2**, que permite maior penetração da luz natural no eixo de avaliação, já viabiliza a configuração de ambientes que atendam a esse critério direcionados para norte, leste e oeste, no entanto com limite de profundidade extremamente restrito de 3,67 m, quando considerado a utilização de vidros com TL de 60%. Ambientes direcionados para o sul, assim como na presença da obstrução 1, exibem as menores restrições de profundidade podendo atender ao requisito definido como superior pela IES em ambientes com profundidade de 3,67 m com a utilização de vidros com TL de 40%, e de 5,13 m com vidros cuja TL é de 60%.

Este estudo demonstrou que a obstrução que apresenta maior taxa de ocupação e menor altura, obstrução 2, revelou maior redução na autonomia de luz natural nos pontos de

avaliação do modelo de estudo quando comparada com os resultados obtidos na presença da obstrução que apresenta uma volumetria com menor TO e maior altura. A obstrução de menor TO influenciou de forma diferente os resultados de acordo com a posição da quadra. No entanto, considera-se importante a restrição de TL mínima de vidros para pavimentos que recebem grande influência do entorno, para servir de orientação e alerta para profissionais de arquitetura que não disponibilizam em seus escritórios capacidade técnica para tal avaliação.

No momento em que se confrontam os resultados obtidos neste estudo com os obtidos no trabalho de Reinhart (2014), mencionado anteriormente, que de forma geral encontrou valores de 1 e 2 vezes a altura da janela para autonomia de luz natural quando considerada a presença de cortinas, o critério de avaliação de autonomia de luz natural utilizado nesta pesquisa, sendo o definido como aceitável pela IES, para o modelo de estudo encontrou valores de autonomia que compreendem esse intervalo nos cenários de obstruções avaliadas apenas quando considerados vidros com TL de 88% na presença da obstrução 1, e com vidros com TL de 88% e 60% na presença da obstrução 2, exceto para a orientação sul, que, na presença dessa obstrução, com a utilização de TL de 40% também fica dentro desse

intervalo. No entanto os cenários de vidros com TL de 60% na presença da obstrução 1 e de vidros com TL de 40% no cenário de avaliação das orientações norte, leste e oeste na presença da obstrução 2 ficam bem próximos desse intervalo de relação de altura de janela e profundidade do ambiente com autonomia de luz natural, sendo estimada uma área de atendimento $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ para ambientes com até 2,20 m de distância em relação à fachada.

No que diz respeito aos cenários sem obstrução, a distância em relação à fachada em que é viabilizada a configuração de ambientes é de, no mínimo, 9 m para todas as orientações solares e TL de vidro avaliadas, valor esse que representa aproximadamente 3,5 vezes a altura da janela, superior ao intervalo de 1 a 2 vezes a altura da janela. Os resultados reforçam a recomendação de Reinhart para que se utilizem simulações a fim de se estabelecer as relações e as avaliações, uma vez que o entorno e a TL do vidro impactam de forma significativa os resultados.

O estudo de Santos, Auer e Souza (2017), também já mencionado neste trabalho, demonstrou que, em suas avaliações, apenas ambientes direcionados para o sul excederam o

valor estabelecido como preferível pelos usuários de acordo com a LM-83, ou seja, sDA > 75% (avaliação na cidade de Cuiabá, MT, Brasil), quando consideradas obstruções frontais com distância de 5 m mesmo com vidro cuja TL é de 88%. A presente pesquisa também demonstrou que configurações de ambientes que visam atender ao nível preferível definido pela IES para o modelo de estudo com a presença da obstrução frontal 1 são viabilizadas apenas em ambientes direcionados para o sul com a utilização de vidros com TL de 88%, pois o limite de profundidade para ambientes direcionados para o norte, leste e oeste na presença dessa obstrução e com essa TL de vidro é de apenas 3,67 m. No entanto, na presença da obstrução frontal 2, é possível a configuração de ambientes com profundidade maior que 5 m para todas as orientações quando a TL do vidro é de 88% e, se são empregados vidros com TL de 60%, essa distância é viabilizada apenas em ambientes direcionados para o sul. O limite de profundidade para as demais orientações, para vidros com TL de 60%, é de 3,67 m.

4.3 | CONSIDERAÇÕES SOBRE O ATENDIMENTO DOS REQUISITOS DA CERTIFICAÇÃO LEED V4.1 E WELL V2

Os resultados deste estudo demonstraram grande diferença de autonomia de luz natural entre o pavimento superior e o inferior da edificação, ressaltando a importância dos critérios mínimos de qualidade serem avaliados por pavimento, a fim de que seja impulsionado o desenvolvimento do projeto a fim de atender aos critérios de iluminação natural em toda a edificação. A certificação LEED avalia os edifícios conforme os resultados obtidos na área total de ocupação regular da edificação – medida que não garante qualidade em todos os pavimentos. Já a certificação WELL identifica essa importância e exige que o critério definido pela IES para bonificação do projeto seja avaliado por pavimento, mostrando ser mais criteriosa a análise. Além de permitir que o percentual de área mínima seja atendido na avaliação da área total da edificação, a certificação LEED na sua última versão (atualização em 2018) flexibilizou o requisito de bonificação para projetos com atendimento de $DA_{(300)}$ para, pelo menos, 40% da área de ocupação regular, ou seja, se os pavimentos superiores apresentarem um atendimento

de 100% da área, como no caso do edifício de estudo, os pavimentos inferiores podem apresentar valores bem inferiores a esse e a edificação ainda ser bonificada com o atendimento do crédito de iluminação natural. O estudo de Beltran e Liu (2020), ao qual já se fez referência neste trabalho, demonstrou que é possível atender aos requisitos da certificação LEED v4 em todas as latitudes e orientações, no entanto é necessário o uso de proteções solares de acordo com a orientação e a latitude do projeto. Logo, como considerado pelos autores, a remoção do critério de ASE e a flexibilização da área de atendimento mínima do requisito de $sDA_{(50\%)}$ promovem o uso de vidros e não incentivam os profissionais a projetar com o objetivo de aproveitar a luz natural nos ambientes de trabalho. As certificações, muitas vezes, funcionam como desenvolvedoras de mercado, apresentando critérios atualizados de avaliações em nível internacional que, frequentemente, evoluem com o aumento da tecnologia e o desenvolvimento de produtos. Esse desenvolvimento precisa acontecer no conceito do projeto arquitetônico que também deve evoluir, visando responder às demandas necessárias que não podem ser resolvidas apenas pela busca por estratégias tecnológicas. No entanto, a quantidade de reclamações no canal de comunicação do USGBC que mencionam dificuldade de atendimento dos critérios de iluminação natural demonstra

que alguns projetistas não percebem esse fato como um desafio arquitetônico que necessita de uma resposta e que deve ser resolvido através de projetos com um olhar voltado para eficiência e para qualidade, o qual deve existir desde as primeiras etapas do desenvolvimento do projeto.

Quando são analisados os resultados de autonomia de luz natural nos pontos de avaliação obtidos neste estudo com a presença de obstruções frontais, os últimos pontos (distâncias de 3,85 m e 4,95 m) já possuem valores baixos de autonomia de luz natural, de modo que as distâncias máximas definidas pela certificação WELL para bonificação de projetos através da avaliação de layout arquitetônico (requisito que limita a distância em relação às fachadas de vidros para a localização de, pelo menos, 70% das estações de trabalho, sendo esse limite de 7,50 m para a conquista de um ponto e de 5 m para a conquista de dois pontos, desde que a TL do vidro seja de, pelo menos, 40%) podem não garantir a presença de luz natural nesses ambientes. Cabe salientar que essa opção do atendimento por limitação de distâncias das estações de trabalho em relação às fachadas bonifica a edificação com dois pontos, ou seja, a mesma bonificação do critério avaliado por meio de simulação computacional, que proporciona uma análise mais precisa do comportamento

da luz natural de modo a garantir mais qualidade (Quadro 3 e 4, pág 53 e 54). No entanto, o fato de a certificação limitar uma TL de vidro mínima de 40% já é um aspecto positivo. Quando é avaliada a área comercial do pavimento tipo deste trabalho com a utilização de vidros com TL de 40% para as quatro orientações de quadras avaliadas, por exemplo, os resultados de $sDA_{(300,50\%)}$ são entre 55% e 59%, ou seja, próximos do limite definido pela IES como mínimo aceitável. Logo a referência da certificação WELL de restringir a TL de vidro em um valor mínimo de 40% a fim de que sejam atendidos aos requisitos para avaliações de layout arquitetônico apresenta um benefício; no entanto, infelizmente esse requisito de TL de vidro mínima (requisito que pertencia apenas aos métodos de avaliação sem simulação) foi eliminado dos critérios obrigatórios na última atualização da certificação, que data de 2020. Com isso, é possível concluir que os critérios obrigatórios para a conquista dessa certificação, que não são obtidos via simulação computacional, não garantem um valor mínimo de luz natural no interior dos ambientes, embora possam auxiliar no desenvolvimento de projetos arquitetônicos. Uma das opções para que se atenda ao requisito obrigatório de luz natural, critério relacionado a layout arquitetônico, que define distância mínima de 6 m em relação à fachada para localização de áreas regularmente ocupadas, e ao critério rela-

cionado ao projeto arquitetônico, que define área de vidro mínima por pavimento de, pelo menos, 7% da área de piso (ambas opções apresentadas na seção 3.2 deste trabalho), seria apresentar pelo menos algum requisito relacionado à TL do vidro, como ocorria na versão anterior dessa certificação. Apesar de existirem diversas variáveis que influenciam os resultados de luz natural, como altura e posição da janela, uso de proteções solares entre outros, a limitação de TL mínima de vidro poderia auxiliar em arquiteturas com melhor acesso à luz natural, sendo um critério para evitar que sejam utilizados vidros com TL muito baixas. Fica evidente que critérios de limitação de área mínima de abertura (como mencionado no Código de Obras da cidade e na certificação WELL) para atendimento dos critérios da IES relacionados à iluminação natural não são eficazes. A fim de garantir iluminação natural nos ambientes através de área mínima de janela, deve ser definido, pelo menos, algum requisito relacionado à TL mínima para os vidros. Esses requisitos podem ser diferentes dependendo da orientação solar, uma vez que o impacto da operação de cortinas diferencia os resultados.

As características do vidro empregado nos três edifícios com certificação LEED na cidade de Porto Alegre (vidros com TL igual a 40% e 30%) demonstram que não está sendo dada a

devida atenção aos critérios de qualidade de luz natural dos edifícios comerciais que estão buscando eficiência energética na cidade. A vantagem dessas edificações já certificadas na cidade é que elas estão localizadas em esquinas de vias, onde a presença de obstrução ocorre apenas em duas fachadas. No entanto esses prédios não apresentam tratamento diferenciado nessas fachadas que, de acordo com os resultados obtidos nesse trabalho, devem sofrer impacto significativo do entorno. Fazem-se necessários requisitos mínimos nacionais de iluminação natural nos edifícios comerciais, uma vez que o atual selo nacional de eficiência energética exige apenas eficiência mínima e não impõe que sejam atendidos critérios mínimos de qualidade da luz natural.

4.4 | ANÁLISE SOBRE O IMPACTO DA METODOLOGIA DE OPERAÇÃO DE CORTINAS NOS RESULTADOS DE DA_(300,50%)

Com o objetivo de entender o impacto da operação de cortinas apenas em função da orientação solar estudada e de compreender separadamente a influência do entorno nessa operação, serão apresentados os resultados do pavimento tipo superior, sem a presença de obstruções frontais e, na sequência, os resultados considerando as duas obstruções frontais estudadas.

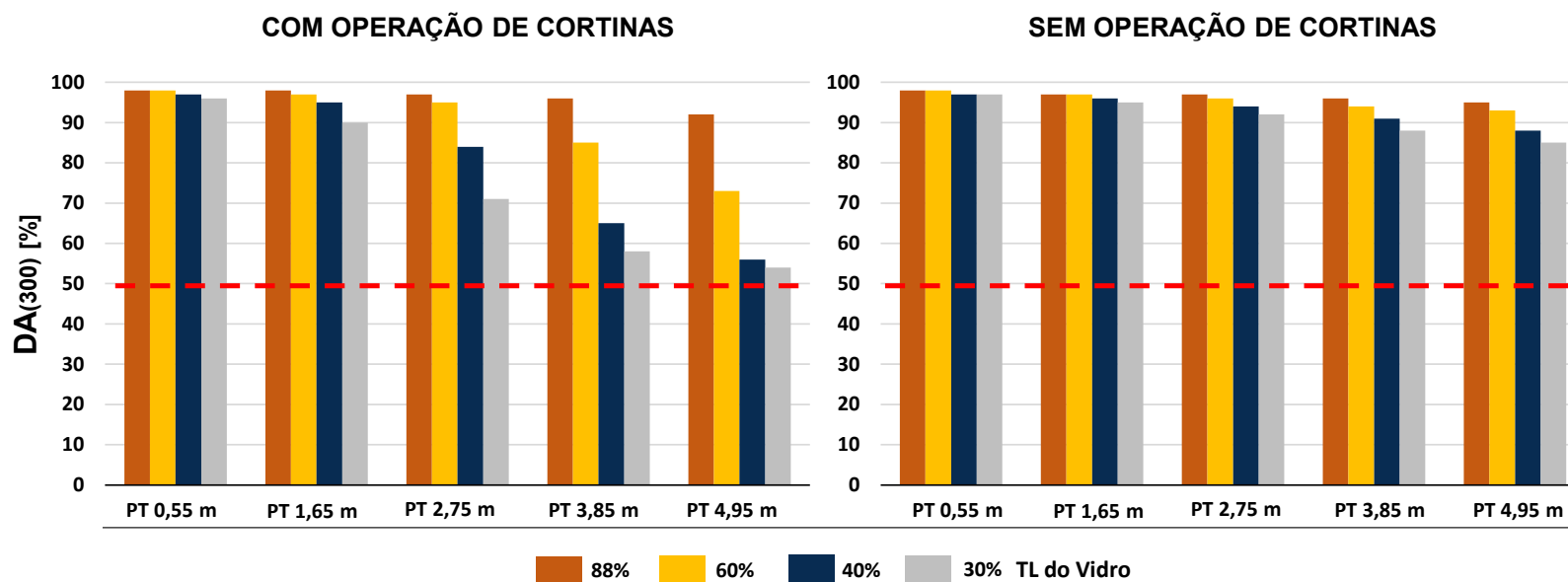
4.4.1 | PAVIMENTO TIPO SUPERIOR SEM INFLUÊNCIA DE OBSTRUÇÕES

Quando são comparados os resultados DA_(300,50%) considerando e não considerando a operação de cortinas, os resultados do **pavimento tipo superior da edificação de estudo** considerando a fachada direcionada para o cenário sem obstrução frontal, são os seguintes para os pontos de avaliação perpendiculares às orientações solares estudadas.

Orientação norte: No cenário de vidro com TL de 88%, os resultados praticamente não apresentam redução nos valores de $DA_{(300)}$. As reduções mais significativas (redução no tempo maior que 10%) começam a partir do ponto 3,85 m para o cenário de TL de 60% e a partir do ponto 2,75 m para os cenários de TL de 40% e 30% (Figura 55).

Figura 55

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada norte do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo



Fonte: Elaborado pela autora.

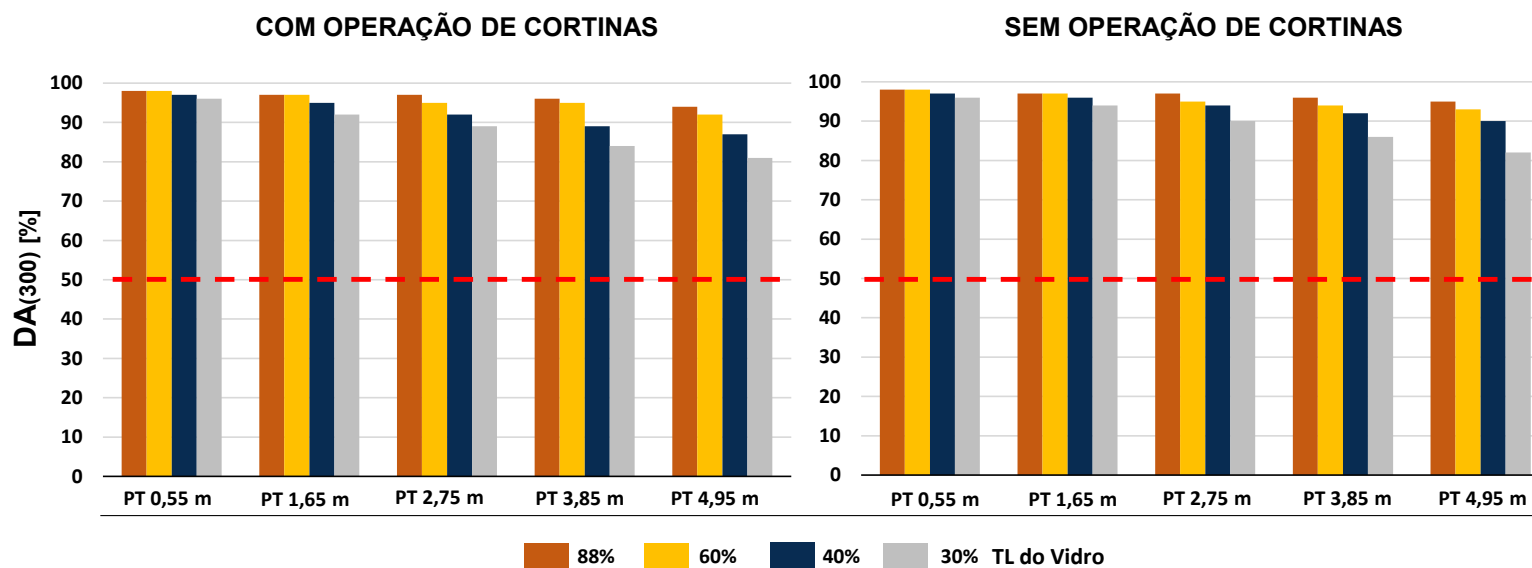
Os resultados demonstram que o impacto do fechamento do sistema de proteção interna é mais significativo à medida que a TL do vidro é reduzida. Ou seja, o uso de vidros com TL mais alta permite uma passagem de luz natural de forma a garantir uma iluminância de 300 lux no interior do pavimento mesmo com o fechamento do sistema de proteção solar interno, que é simulado através da redução da pas-

sagem da luz solar difusa. Com isso, no cenário de vidros com TL de 88%, os resultados de $DA_{(300,50\%)}$ não são alterados; no entanto, quando considerado o vidro com TL igual a 30%, a redução do percentual do tempo em que o último ponto de avaliação apresenta autonomia de 300 lux para, no mínimo, 50% do tempo é de 36%.

Orientação sul: Os resultados de $DA_{(300)}$ não apresentam mudança significativa nos valores, visto que essa orientação recebe incidência direta de sol em um período muito curto durante o ano e com isso a operação de cortinas praticamente não interfere nos resultados (Figura 56).

Figura 56

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada sul do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

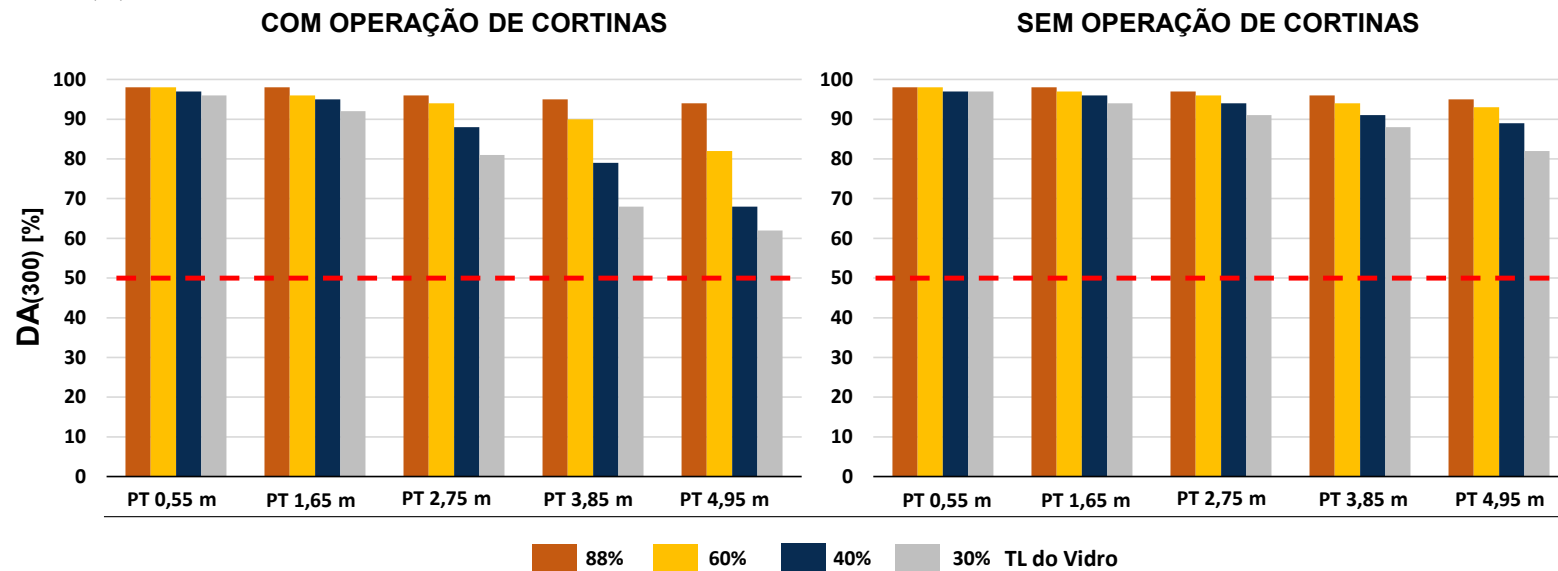


Fonte: Elaborado pela autora.

Orientação leste: Os resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos de análise perpendiculares à fachada leste não apresentaram redução para o cenário de vidro com TL igual a 88%, mas apresentaram redução mais significativa (redução no tempo maior que 10%) para o ponto 4,95 m no cenário (TL de 60%) e para os pontos 3,85 m e 4,95 m para os cenários de TL igual a 40% e 30% (Figura 57).

Figura 57

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada leste do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo



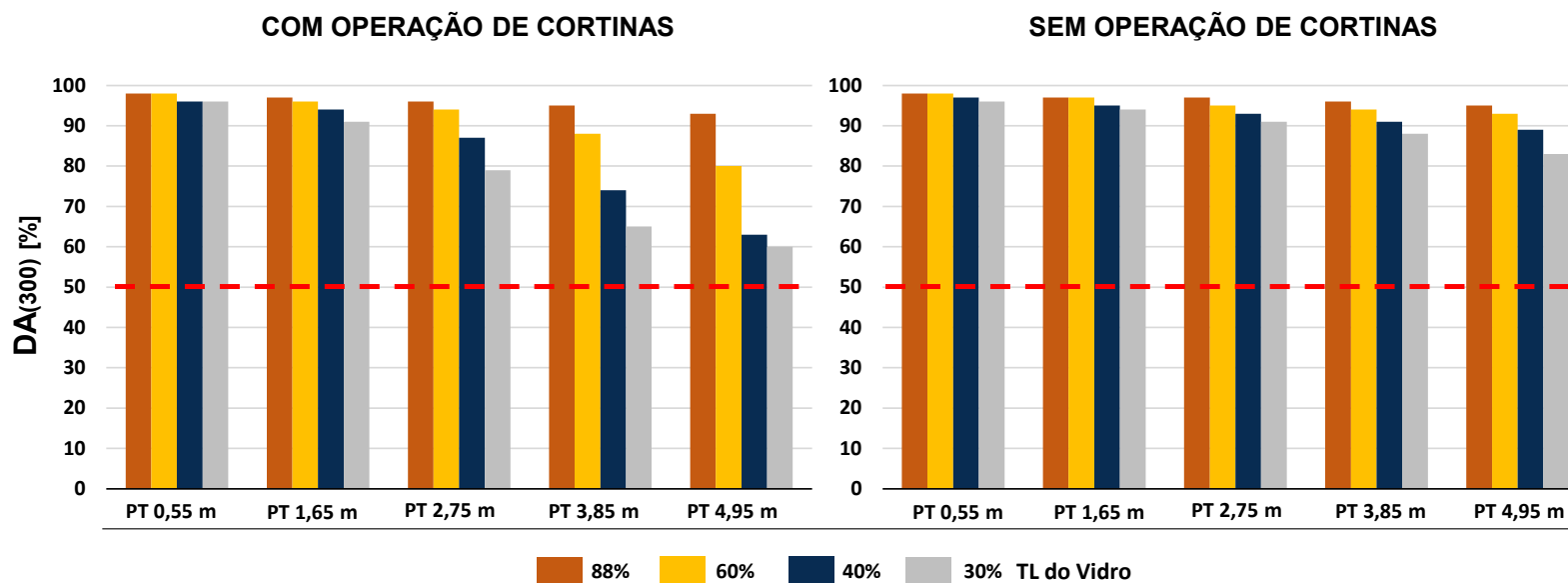
Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados demonstram que o impacto do fechamento do sistema de proteção interna é mais significativo à medida que a TL do vidro é reduzida. No cenário com vidros cuja TL é de 88%, os resultados de $DA_{(300,50\%)}$ não são alterados; no entanto, quando considerado o vidro com TL de 30%, a redução do percentual do tempo em que o último ponto de avaliação apresenta autonomia de 300 lux para, pelo menos, 50% do tempo é de 24%.

Orientação oeste: Os resultados dos pontos de análise perpendiculares à fachada oeste não apresentam diferença para o cenário de vidro com TL de 88%; eles começam a apresentar diferença de, pelo menos, 10% de redução no tempo com autonomia dessa iluminância para o ponto 4,95 m do cenário de TL de 60% e para os pontos 3,85 m e 4,95 m para os cenários de TL igual a 40% e 30% (Figura 58).

Figura 58

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada oeste do pavimento superior, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo



Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados demonstram que o impacto do fechamento do sistema de proteção interna é mais significativo à medida que a TL do vidro é reduzida. No cenário de vidros com TL de 88%, os resultados de $DA_{(300,50\%)}$ não são alterados; no entanto, quando considerado o vidro com TL de 30%, a redução do percentual do tempo em que o último ponto de avaliação apresenta autonomia de 300 lux para, no mínimo, 50% do tempo é de 27%.

Segundo os resultados obtidos por orientação solar estudada, é possível observar o impacto significativo dessa operação nos resultados de autonomia de 300 lux para as orientações norte, leste e oeste. As malhas do sul, uma vez que praticamente não recebem incidência de sol ao longo do ano, não apresentam mudanças significativas nos resultados. Mesmo que todos os pontos avaliados perpendiculares às orientações avaliadas atendam à iluminância de 300 lux para 50% do tempo, é possível observar a redução do percentual do tempo em que os pontos de avaliação apresentam essa autonomia. No cenário de vidro com TL de 88%, a operação de cortinas não impacta de forma significativa os resultados, sendo que praticamente não apresenta redução no tempo total com autonomia de 300 lux nos pontos de avaliação. Isso demonstra que, pelo fato de o vidro permitir uma passagem significativa de luz visível, mesmo com a redução dessa transmissão ocasionada pela simulação do fechamento do sistema de proteção interno, ainda passa luz suficiente para atender à autonomia de 300 lux para 50% do tempo em todos os pontos de avaliação. No cenário de vidro

com TL de 60%, os três primeiros pontos de avaliação também não apresentam modificação nos resultados para as orientações avaliadas. Entretanto, o ponto 3,85 m e o ponto 4,95 m apresentam redução de $DA_{(300)}$ de, respectivamente, 10% e 22% quando considerada a orientação solar norte e de, aproximadamente, 5% e 13% quando consideradas as orientações leste e oeste devido à presença da operação de cortinas. Quando analisados os resultados do cenário de vidro com TL de 40%, não há mudança nos resultados para os dois primeiros pontos de avaliação e, no que diz respeito aos pontos 2,75 m, 3,85 m e 4,95m quando considerada a orientação norte, a redução é de, respectivamente, 11%, 29% e 36%. A redução desses pontos para a orientação leste foi de, respectivamente, 6%, 13% e 24%, e para o oeste de 6%, 19% e 29%. No caso do vidro com TL de 30%, o ponto 2,75 m já começa a apresentar redução, a qual é de 23% quando considerada a orientação norte e de aproximadamente 12% para as orientações leste e oeste. O ponto 3,85 m e o ponto 4,95 m nesse cenário de TL de vidro apresentam diminuição de aproximadamente 35% para a orientação norte e de, aproximadamente, 23% e 27% para as orientações leste e oeste, respectivamente (Tabela 7).

Tabela 7 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro sem a presença de obstrução frontal

		Ponto 0,55 m	Ponto 1,65 m	Ponto 2,75 m	Ponto 3,85 m	Ponto 4,95 m
Norte	TL 88%	0	1	0	0	3
	TL 60%	0	0	1	10	22
	TL 40%	0	1	11	29	36
	TL 30%	0	5	23	34	36
Leste	TL 88%	0	0	1	1	1
	TL 60%	0	1	2	4	12
	TL 40%	0	1	6	13	24
	TL 30%	1	2	11	23	24
Oeste	TL 88%	0	0	1	1	2
	TL 60%	0	1	1	6	14
	TL 40%	1	1	6	19	29
	TL 30%	0	3	13	26	28

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados demonstraram a importância da consideração da operação de cortinas para avaliações de $DA_{(300)}$, pois essa variável impacta significativamente os resultados. Esse é um aspecto fundamental na análise de edifícios de uso comercial, visto que, frequentemente, nesse tipo de edifício, os sistemas de proteção interno serão fechados na presença de incidência direta de sol devido a questões de conforto visual. É importante o entendimento do impacto dessa operação nas diferentes orientações solares. Por exemplo, quando não se considera a operação de cortinas na análise de $DA_{(300)}$, a orientação solar que permite maiores valores nos pontos de avaliação do estudo é a fachada norte e, quando considerada essa operação, esta é a orientação que apresenta os menores valores, sendo a orientação sul a que apresenta os melhores resultados. Ou seja, o excesso de incidência direta de sol acarreta na redução de autonomia de luz natural no interior dos ambientes devido ao fechamento do sistema de proteção solar interno. Com isso, o uso de proteções solares externas corretamente dimensionadas de modo a reduzir a incidência direta de sol, pode proporcionar ambientes com maior autonomia de luz natural. Isso reforça a importância da materialização das fachadas da edificação de formas diferentes para cada orientação solar, além da relevância do tratamento diferenciado em pavimentos inferiores.

A comparação dos resultados com e sem operação de cortinas e o tempo aproximado em que o sistema é considerado fechado para cada orientação solar demonstraram a necessidade do dimensionamento de proteções solares externas para controlar a incidência direta de sol e viabilizar um maior período com o sistema interno de proteções solares aberto a fim de otimizar a luz natural no interior dos ambientes. Os resultados também evidenciaram que o impacto dessa operação nos resultados de $DA_{(300)}$ é mais acentuado quando empregados vidros de TL baixas (40% ou 30%), pois a iluminância que passa pelo vidro já é bem reduzida e, quando aplicado o fator de redução que simula a presença de cortinas, esse valor fica ainda menor.

Na análise dos resultados de $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta, medida utilizada para fechamento do sistema de proteção interno de acordo com o IES-LM83, o período de tempo com essa autonomia na malha central paralela à fachada norte – malha que apresenta menor influência das demais orientações – é de 41% do tempo no cenário sem obstrução e com vidro cuja TL é de 88%. No que diz respeito aos resultados voltados para o sul, os valores são próximos de zero, já que essa fachada recebe pouca incidência direta de sol. Para

as orientações leste e oeste, os resultados dessa avaliação são de 27% e de 31%. As malhas direcionadas para o norte apresentam os maiores valores de $DA_{(1000)}$, logo essa é a orientação solar – dentre as estudadas – que apresenta o maior número de horas em que o sistema de proteção solar interno é considerado fechado, o que faz com que ela seja a orientação em que a operação de cortinas mais impacta os resultados de autonomia de luz natural, apresentando maior redução nos resultados de $DA_{(300)}$ dos últimos pontos de avaliação quando comparados com os resultados das malhas direcionadas para leste e oeste. Quando observados os resultados de $DA_{(1000)}$ no cenário de TL de 30%, menor valor de TL avaliado neste estudo, o comportamento é similar aos valores obtidos com vidros cuja TL é igual a 88%, no entanto esses valores são inferiores, sendo de 30%, 20% e 23% para as orientações norte, leste e oeste, respectivamente. Isso significa que, em aproximadamente 10% a mais do tempo de avaliação, as orientações leste e oeste apresentaram o sistema de proteção solar interno aberto quando comparadas com a orientação norte (Tabela 8).

Tabela 8 - Maiores resultados de $DA_{(1000)}$ para, pelo menos, cinco pontos de análise por grupo de controle para o cenário sem obstrução

Orientação	TL 88%	TL 30%
Norte	41%	30%
Sul	3%	1%
Leste	27%	20%
Oeste	31%	23%

Fonte: Elaborado pela autora

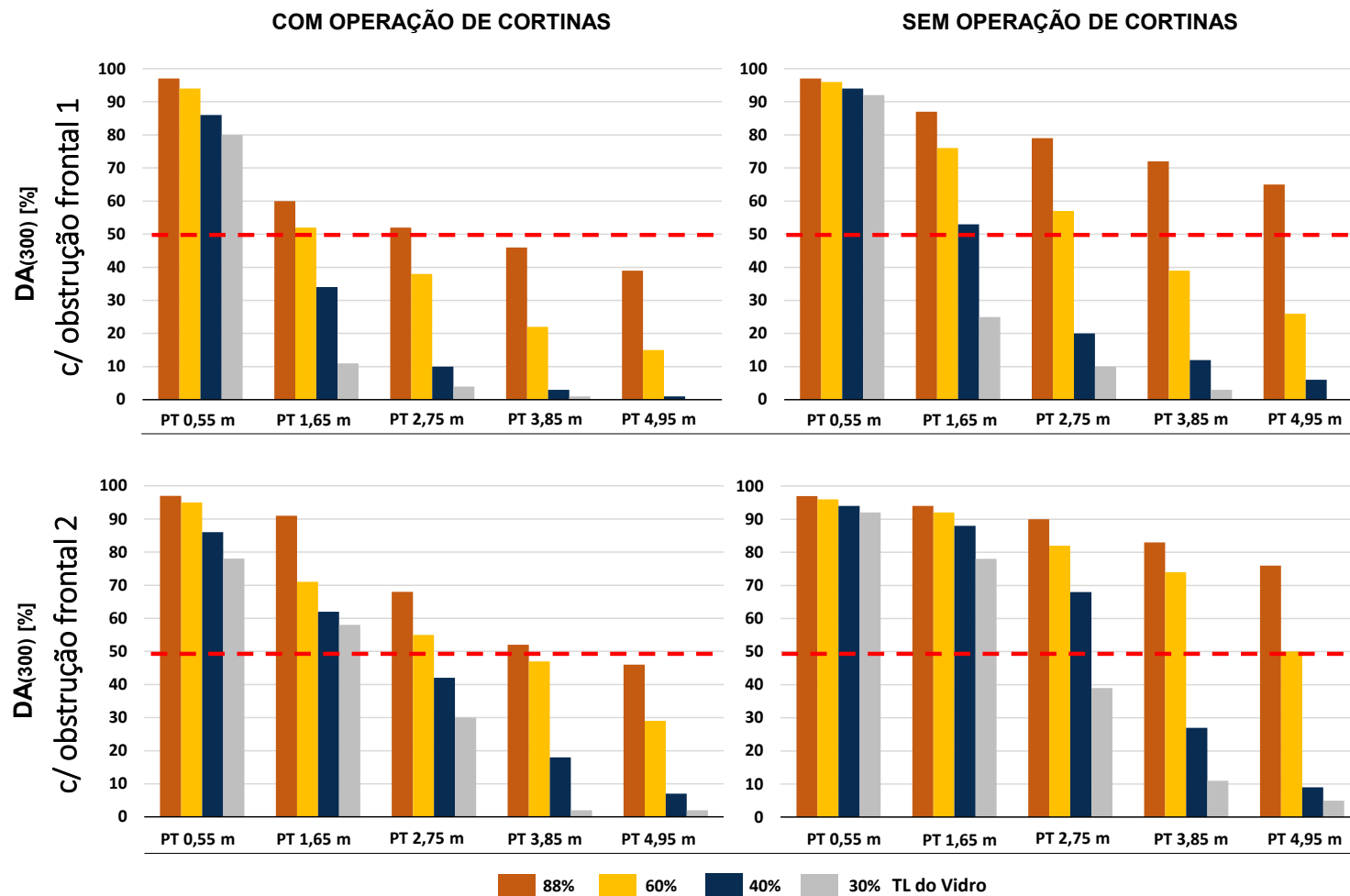
4.4.2 | PAVIMENTO TIPO INFERIOR: INFLUÊNCIA DAS OBSTRUÇÕES FRONTAIS 1 E 2

No momento em que se analisa o atendimento de, no mínimo, 50% do tempo com autonomia de 300 lux, considerando e não considerando a operação de cortinas, os resultados do **pavimento tipo inferior** do modelo de estudo considerando as duas obstruções frontais analisadas são os seguintes para os pontos de avaliação perpendiculares às orientações solares estudadas:

Orientação norte: A avaliação sem a consideração das operações de cortinas viabiliza que todos os pontos de avaliação atendam ao valor de $DA_{(300)}$ para, pelo menos, 50% no cenário de TL igual a 88% na presença das duas obstruções frontais estudadas; levando-se em conta a operação de cortinas, foi atendido até o ponto 2,75 m quando considerada a presença da obstrução frontal 1, e até o ponto 3,85 m quando na presença da obstrução frontal 2. No cenário de utilização de vidros com TL de 60%, o ponto 2,75 m passa atender ao valor de, no mínimo, 50% para $DA_{(300)}$ na presença da obstrução frontal 1, e todos os pontos passam a atender a esse requisito na presença da obstrução frontal 2; no cenário com operação de cortinas, tal critério era atendido apenas até os pontos 1,65 m e 2,75 m, respectivamente. No cenário de TL igual a 40%, a não operação de cortinas permite o atendimento da premissa de um ponto a mais para as duas obstruções frontais estudadas e, no cenário de vidros com TL de 30%, os pontos com atendimento de $DA_{(300)}$ para, pelo menos, 50% do tempo não são alterados, embora aumente um pouco o percentual do tempo em que esses pontos apresentam autonomia de 300 lux (Figura 59).

Figura 59

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada norte do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

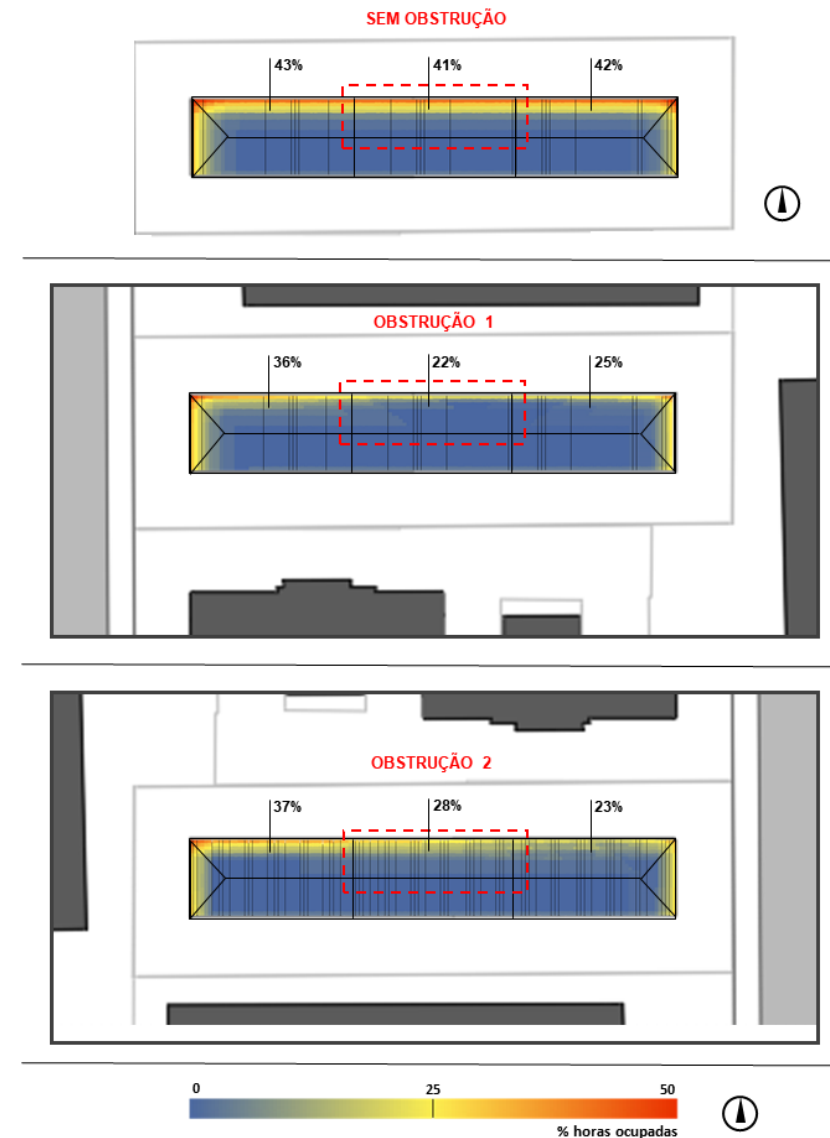


Fonte: Elaborado pela autora.

No que diz respeito aos resultados de $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta, medida utilizada para fechamento do sistema de proteção interno de acordo com o IES-LM83 no cenário de TL igual a 88%, o período do tempo com essa autonomia na malha central paralela à fachada norte – malha que apresenta menor influência em relação às demais orientações – é de 22% no cenário com a presença da obstrução frontal 1 (valor que foi reduzido quase pela metade, pois o valor sem a presença de obstrução era de 41%), e de 28% no cenário com a presença da obstrução frontal 2. No caso do vidro com TL de 30%, o comportamento é similar àquele obtido com vidro de TL igual a 88%, no entanto os valores são inferiores: 30%, 14% e 17% para o grupo de controle central, considerando o cenário sem obstrução, com a obstrução 1 e com a obstrução 2, respectivamente (Figuras 60 e 61).

Figura 60

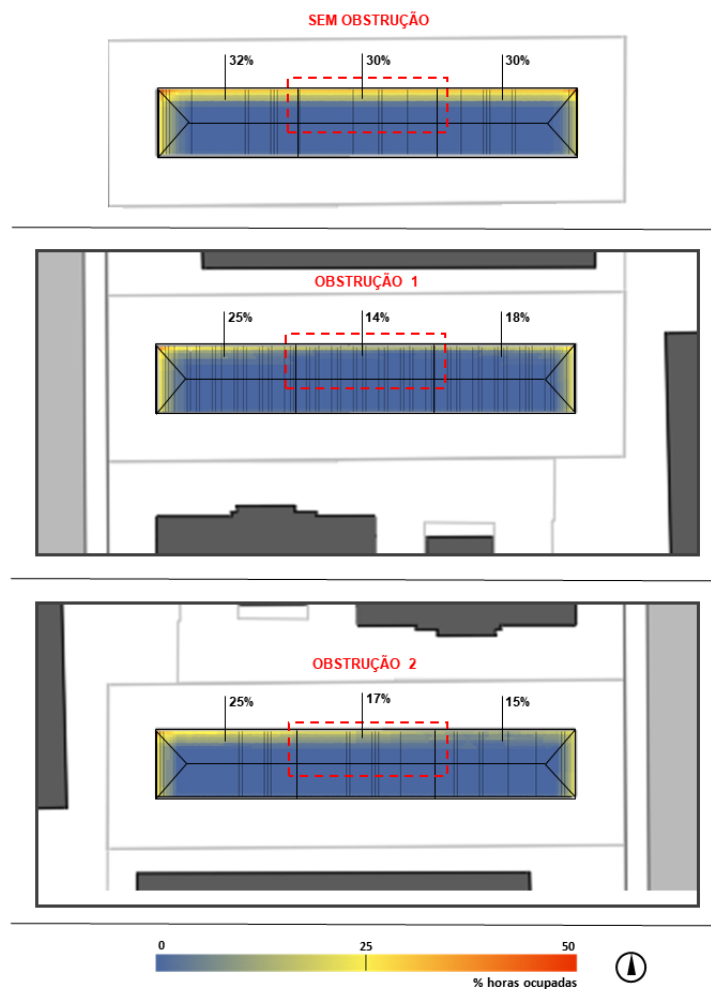
Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada norte para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 88%



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 61

Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada norte para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 30%



Fonte: Elaborado pela autora.

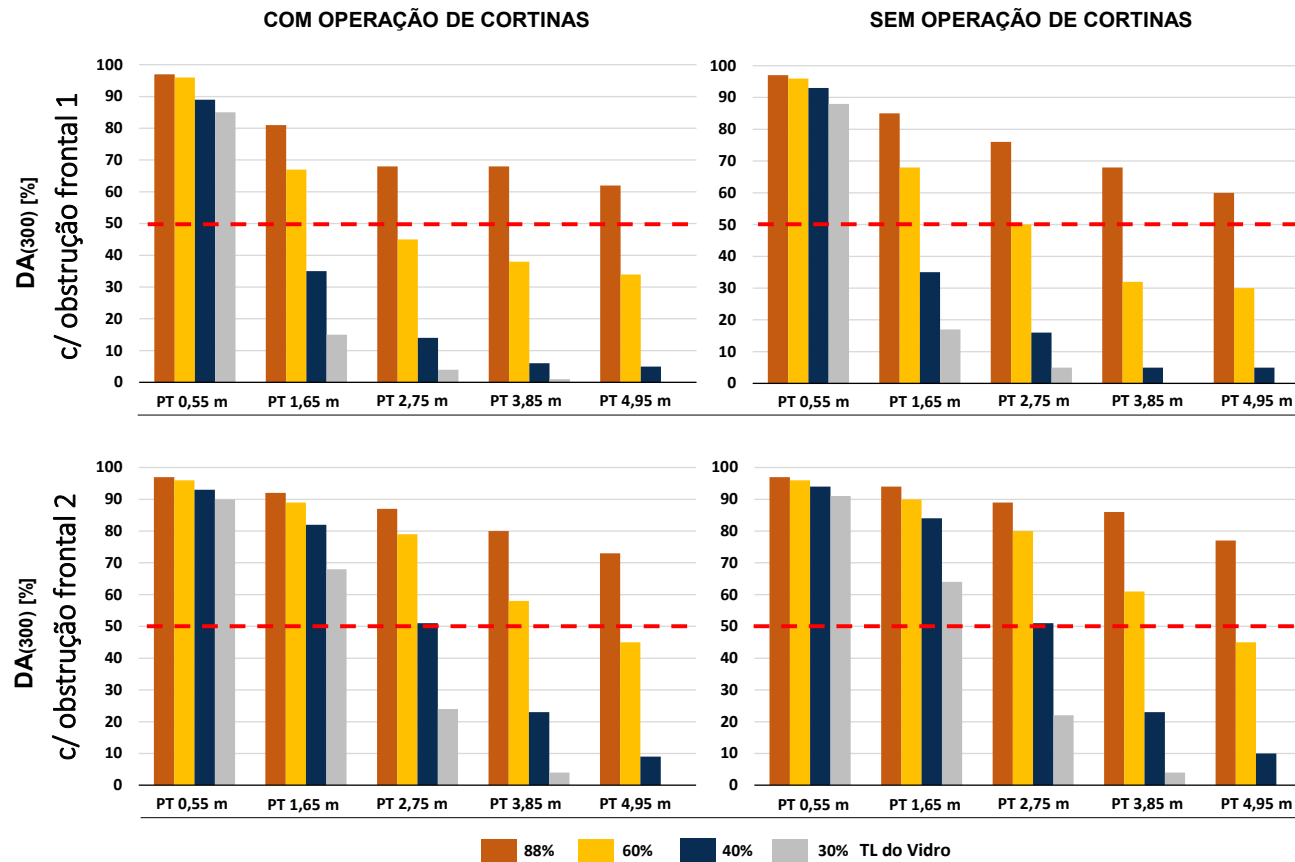
A presença da obstrução 1, embora constitua uma pequena diferença, proporciona um tempo menor com autonomia de $DA_{(1000)}$, ou seja, o sistema de proteção interno foi considerado fechado por um período menor, quando comparado com os resultados da obstrução 2. Dessa forma, a obstrução 1 ocasiona um bloqueio maior de radiação direta quando comparada com a obstrução 2, nessa configuração e orientação de quadra, e proporciona maior redução na autonomia de luz natural para as avaliações, considerando e não considerando a operação de cortinas.

As obstruções 1 e 2, quando consideradas em frente à orientação solar norte apresentam uma redução na incidência de radiação direta na malha de avaliação de 50% e 30%, respectivamente. Logo, na presença dessas obstruções, o sistema de proteção apresentará essa redução no percentual do tempo em que é considerado fechado. No entanto, mesmo que o sistema de proteção apresente menor percentual do tempo fechado, os resultados de $DA_{(300)}$ são reduzidos significativamente devido à presença das obstruções.

Orientação sul: A operação de cortinas praticamente não impacta os resultados de $DA_{(300)}$ para 50% do tempo, uma vez que essa orientação apresenta pouca incidência direta de sol e com isso o sistema de proteção fica acionado por um período muito curto (Figura 62).

Figura 62

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada sul do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

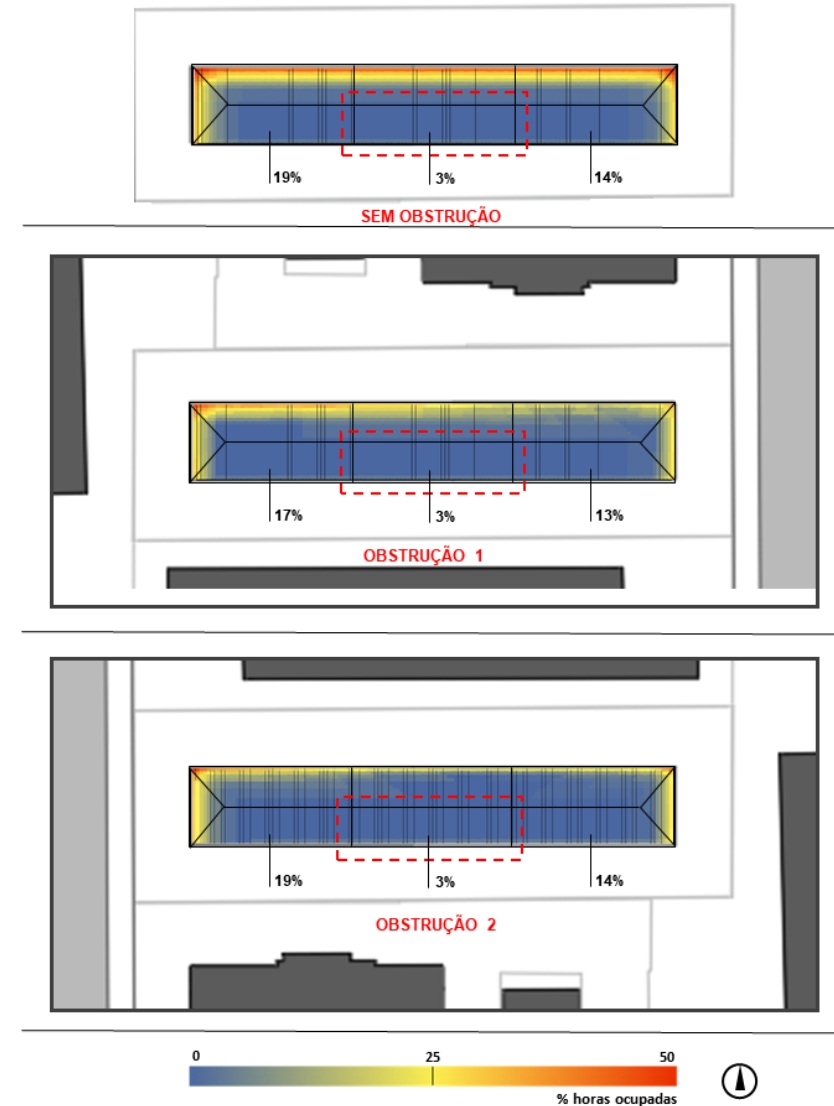


Fonte: Elaborado pela autora.

Quando observamos os resultados de $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta, o período do tempo em que a malha central paralela à fachada sul (malha com menor influência das demais orientações) apresenta autonomia com essa iluminância é próximo de zero, já que essa fachada recebe pouca incidência direta de sol. A autonomia do tempo com essa iluminância é de 3% para os três cenários de obstruções frontais quando considerado o vidro com TL de 88%, e de 1% quando considerado o vidro com TL de 30%. Nas malhas laterais, embora elas apresentem valores próximos de zero em praticamente toda a extensão da fachada (o que pode ser verificado nas imagens das Figuras 65 e 66 através da legenda de cores), a incidência direta de sol oriunda das fachadas laterais influencia os resultados de $DA_{(1000)}$ dessas malhas, apresentando valores entre 13% e 19%, quando considerado o vidro com TL de 88%, e entre 6% e 13%, quando considerado um vidro com TL de 30%, nas três condições de entorno avaliado (Figura 63 e 64).

Figura 63

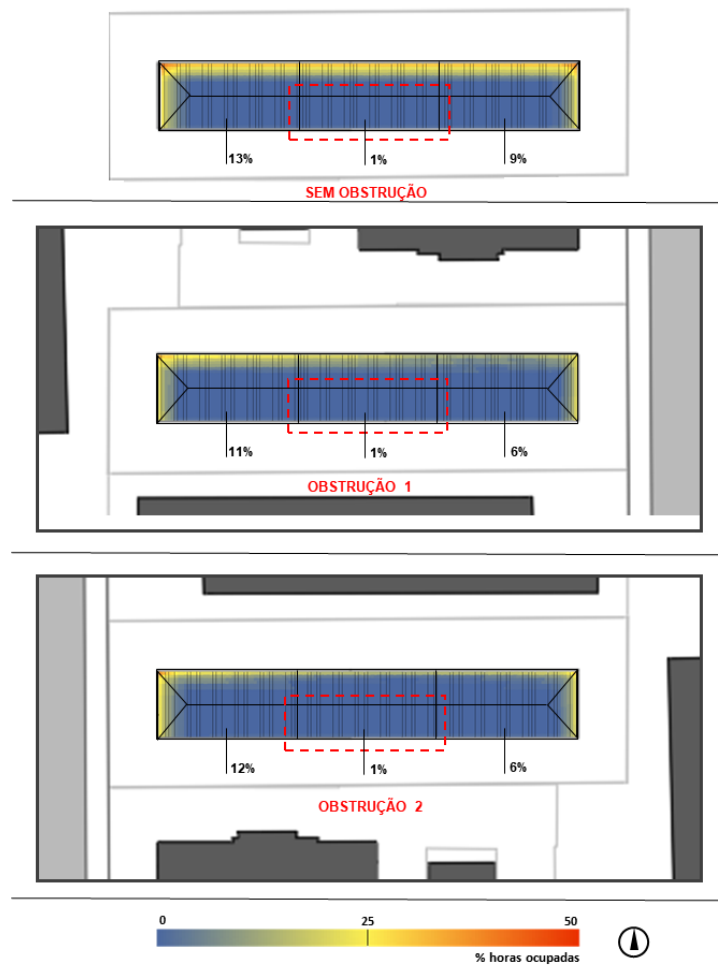
Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada sul para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 88%



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 64

Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada sul para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 30%

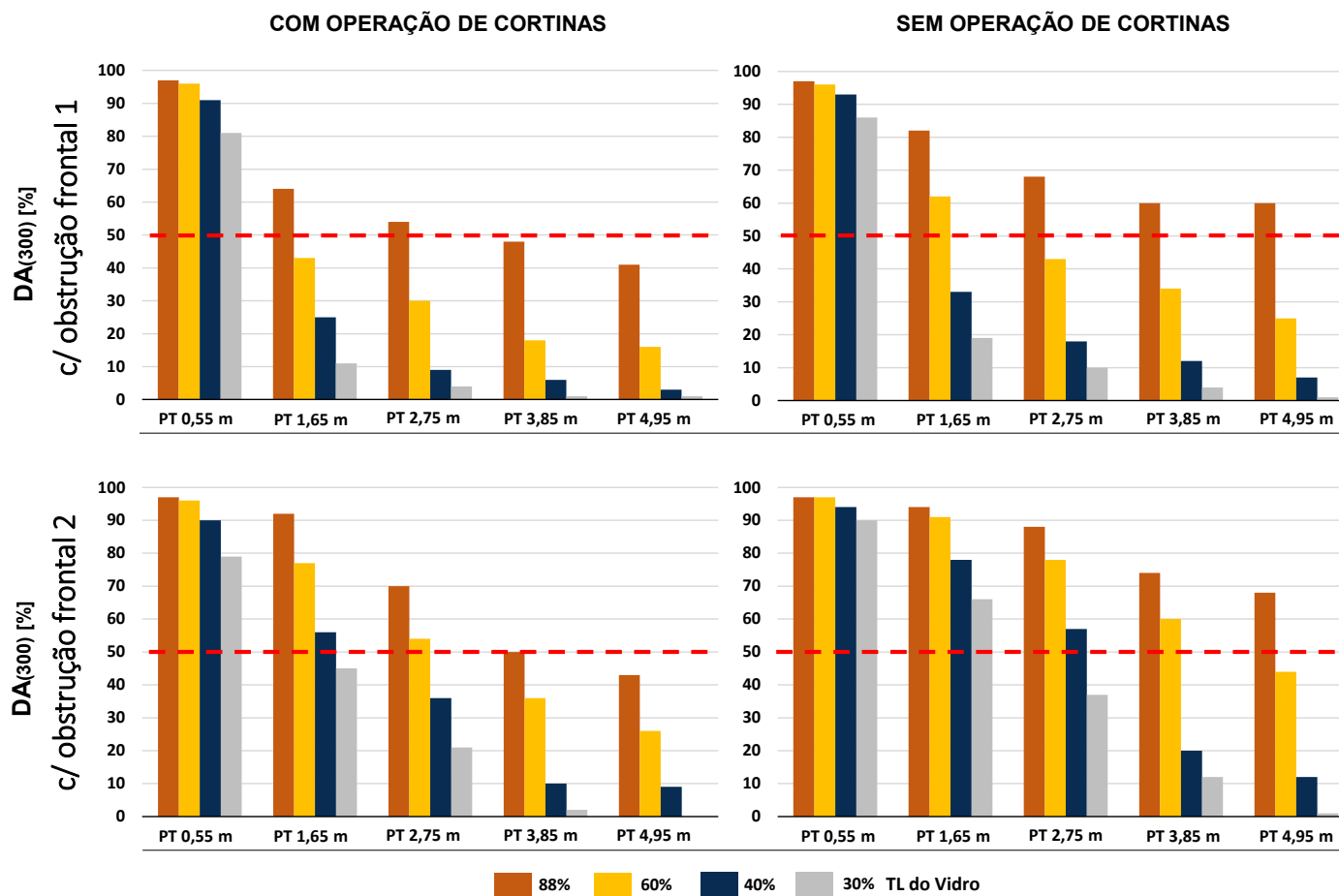


Fonte: Elaborado pela autora.

Orientação leste: A avaliação sem a consideração das operações de cortinas viabiliza que todos os pontos de avaliação atendam ao valor de $DA_{(300)}$ para, pelo menos, 50% no cenário de TL de 88% na presença das duas obstruções frontais estudadas. Quando considerada a operação de cortinas, foi atendido até o ponto 2,75 m na presença da obstrução frontal 1 e até o ponto 3,85 m na presença da obstrução frontal 2. No cenário de utilização de vidros com TL igual a 60%, a não operação de cortinas permite o atendimento do requisito de um ponto a mais para as duas obstruções frontais estudadas. No cenário de TL de 40% e 30% na presença da obstrução frontal 1, o número de pontos que atende ao requisito não é alterado e, na presença da obstrução 2, um ponto a mais atende ao requisito para as duas TL de vidro estudadas (Figura 65).

Figura 65

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada leste do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo



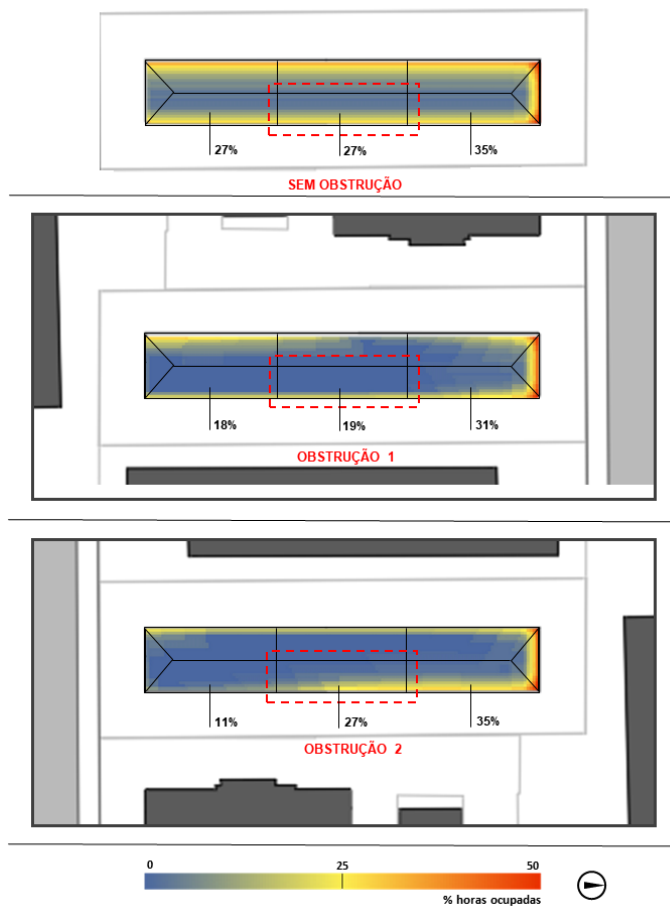
Fonte: Elaborado pela autora.

Quando observamos os resultados de $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta no cenário de TL igual a 88%, o período do tempo com essa autonomia na malha central paralela à fachada leste (malha que apresenta menor influência das demais orientações) é de 19% no cenário com obstrução frontal 1 e de 27% no cenário de obstrução frontal 2, resultado igual ao cenário sem obstrução. Quando considerado o vidro com TL de 30%, o comportamento é similar ao obtido no cenário com TL igual a 88%, no entanto os valores são inferiores, apresentando o resultado de 20%, 12% e 20%, respectivamente, para a malha central sem obstrução, com a obstrução 1 e com a obstrução 2. Percebe-se então que a obstrução frontal 2 não impacta o resultado da malha central nessa orientação e configuração de quadra, uma vez que a edificação mais significativa dessa obstrução está mais para o sul da malha, não influenciando a incidência direta de sol necessária para o acionamento das cortinas. No entanto quando são observados os resultados da malha paralela a essa orientação que faz divisa com a fachada sul (orientação que não recebe incidência direta de sol) e que recebe mais impacto da volumetria de maior altura da obstrução 2, é possível observar o impacto dessa volumetria nos resultados. Os resultados de $DA_{(1000)}$ passam de 27% e 20%, respectivamente para a TL de 88% e 30% quando não conside-

rada a presença de obstruções, para 11% e 6%, quando considerada a presença da obstrução 2. Com isso é possível concluir que a maior volumetria da obstrução 2 ocasiona uma redução nos resultados de $DA_{(1000)}$ de aproximadamente 60%, alterando o resultado de 27% para 11%. Mas, como o objeto dessa avaliação é a influência na malha central do edifício de estudo, percebe-se que a obstrução 2 não influenciou o resultado de $DA_{(1000)}$ na malha central nessa orientação e configuração de quadra (Figuras 66 e 67). Embora a presença da obstrução 2 não tenha reduzido a incidência direta de sol na malha de avaliação (pois o resultado de $DA_{(1000)}$ é o mesmo se avaliado sem a presença de obstrução frontal), os resultados de $DA_{(300)}$ apresentaram redução e sofreram impacto desse entorno conforme apresentado da seção 4.2 (Figura 53).

Figura 66

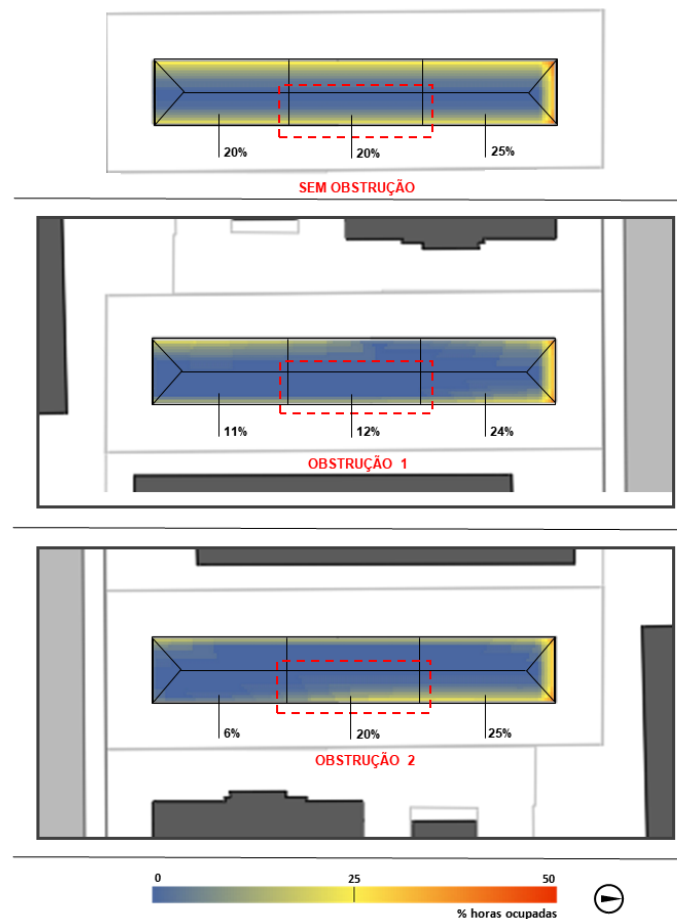
Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada leste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 88%



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 67

Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada leste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 30%



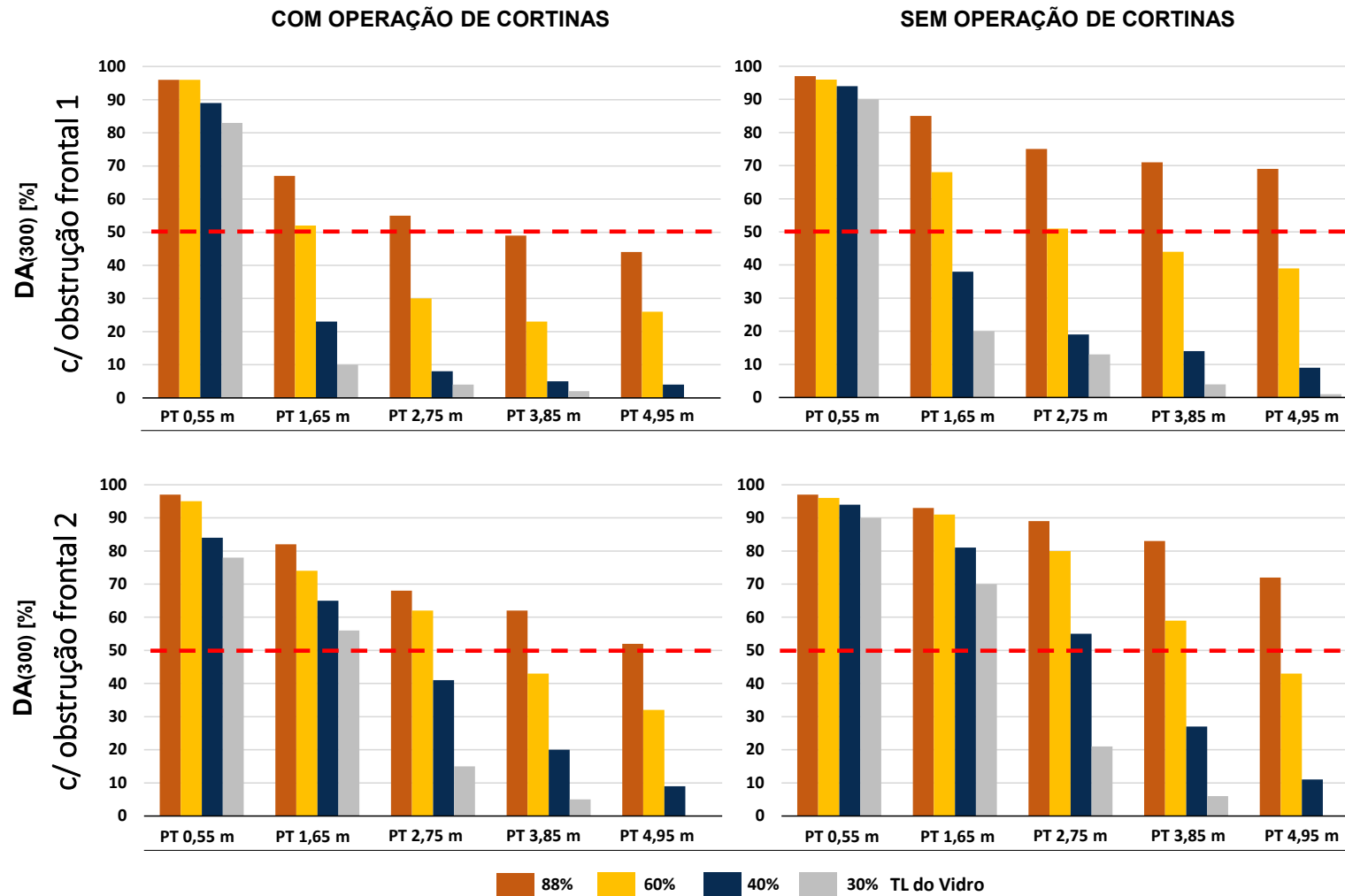
Fonte: Elaborado pela autora.

A presença da obstrução 1 na avaliação da orientação leste ocasiona uma redução no tempo com autonomia de $DA_{(1000)}$ entre 40% e 30% quando considerada a TL de 88% e de 30%, respectivamente; nessa configuração de quadra, a obstrução 2 não apresentou impacto nessa análise na malha central. No entanto os resultados de autonomia de luz natural, na presença da obstrução frontal 2, ficam mais similares aos resultados obtidos na presença da obstrução 1 do que no cenário sem obstrução (Figuras 57 e 65).

Orientação Oeste: A avaliação sem a consideração das operações de cortinas viabiliza que todos os pontos de avaliação atendam ao valor de $DA_{(300)}$ para, pelo menos, 50% no cenário de TL de 88% na presença da obstrução 1; quando considerada a operação de cortinas, atendia-se apenas até o ponto 2,75 m. No cenário de utilização de vidros com TL de 60%, a não operação de cortinas permite o atendimento de um ponto a mais para as duas obstruções frontais estudadas. No cenário de TL igual a 40% e 30% na presença da obstrução 1, o número de pontos com atendimento do requisito não é alterado e, na presença da obstrução 2, mais um ponto atende ao requisito no cenário de vidros com TL de 40% (Figura 68).

Figura 68

Resultados de $DA_{(300)}$ para os pontos de avaliação perpendiculares à fachada oeste do pavimento inferior considerando as obstruções frontais 1 e 2, com identificação em vermelho do limite de 50% do tempo

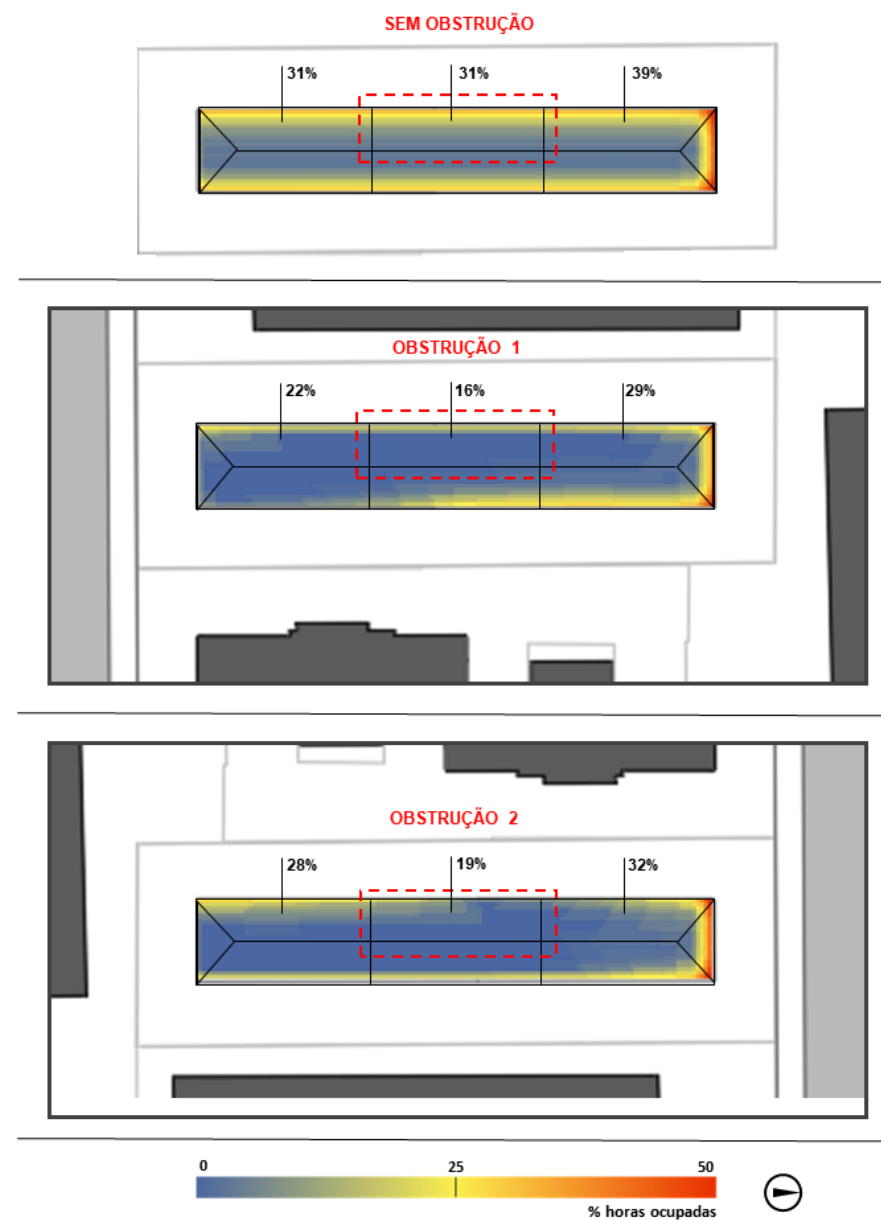


Fonte: Elaborado pela autora.

Na análise dos resultados de $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta no cenário de TL igual a 88%, o período do tempo com essa autonomia na malha central paralela à fachada oeste (malha que apresenta menor influência das demais orientações) é de 16% no cenário com obstrução frontal 1 – praticamente a metade do valor do cenário sem obstrução –, e de 19% no cenário de obstrução frontal 2. Quando considerado o vidro com TL de 30%, o comportamento para a malha central é similar, no entanto os valores são inferiores, sendo de 23%, 12% e 5%, respectivamente para o cenário sem obstrução, com obstrução frontal 1 e 2. Diferentemente dos resultados para a fachada leste, em que a obstrução 2 não impactou o resultado, essa obstrução causa impacto nessa configuração de quadra, pois o volume mais representativo da obstrução 2 está localizado ao norte da malha central, bloqueando por um período maior a incidência de radiação direta (Figuras 69 e 70).

Figura 69

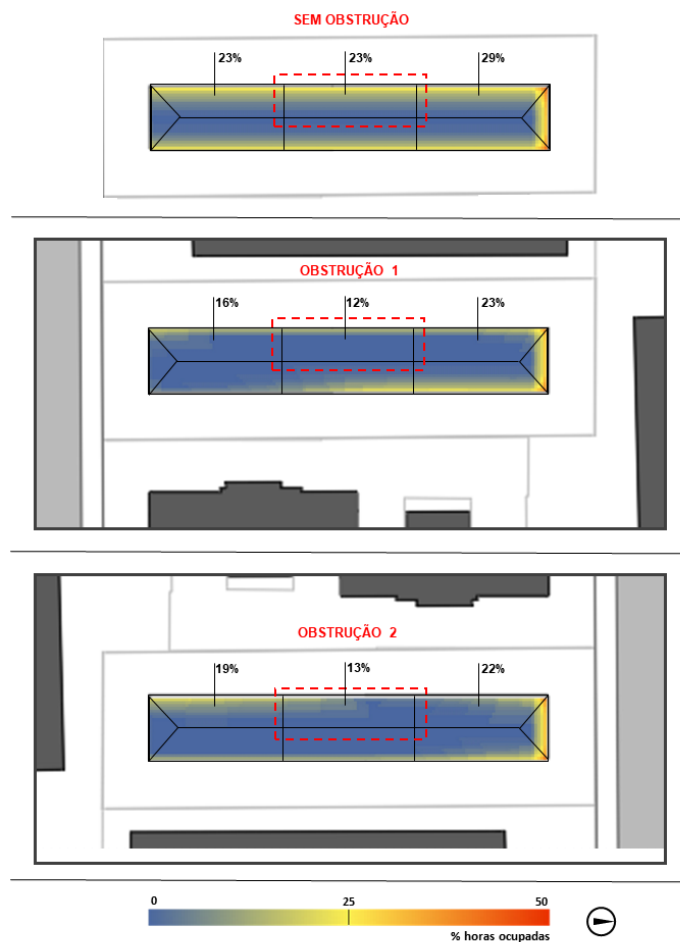
Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada oeste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 88%



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 70

Imagens de planta baixa do pavimento tipo indicando os resultados máximos de $DA_{(1000)}$ para os grupos da fachada oeste para os três tipos de obstruções estudados, com destaque em vermelho para o grupo dos pontos de avaliação – TL 30%



Fonte: Elaborado pela autora.

A presença da obstrução 2 proporciona um tempo menor com autonomia de $DA_{(1000)}$, ou seja, o sistema de proteção interno foi considerado fechado por um período menor, se comparado com os resultados que consideram a obstrução 1; esse comportamento é diferente quando essas obstruções são avaliadas nas orientações norte e leste. No entanto, como já mencionado anteriormente, isso se deve ao fato de que a volumetria de maior altura da obstrução 2 fica em posições diferentes em função da orientação solar da quadra, por exemplo, ela está localizada ao leste na avaliação das orientações norte e ao sul na avaliação da orientação leste. O impacto dessa volumetria influenciou mais quando localizada ao norte, depois quando localizada ao leste, e não exerce influência quando está localizada ao sul. Conseqüentemente, devido ao fato de a orientação norte ocasionar maiores resultados de $DA_{(1000)}$ quando comparada com as demais orientações estudadas e a orientação sul não influenciar esse resultado, como demonstrado nos cenários avaliados sem obstrução. Com isso a obstrução 2 gera um impacto mais significativo no bloqueio da radiação direta quando comparada com a obstrução 1 apenas na avaliação da fachada oeste, devido ao fato de esta obstrução estar ao norte.

A obstrução 1, quando avaliada em frente à fachada leste, reduz a incidência de radiação direta na malha de avaliação em 30%, e a obstrução 2, quando avaliada de frente para essa fachada, não influencia os resultados, permanecendo o percentual de tempo com radiação direta igual ao do cenário sem a presença de obstruções. Essa obstrução não influencia os resultados, pois a maior volumetria da obstrução 2 está localizada ao sul do eixo dos pontos de avaliação. No entanto, quando essa obstrução é considerada em frente à fachada oeste, ela ocasiona uma redução na incidência de radiação direta na malha de avaliação de 40%, pois, nesse cenário de avaliação, a maior volumetria da obstrução 2 está localizada ao norte do eixo avaliado.

Ao avaliar-se o impacto da obstrução 2, os resultados demonstram que ela não bloqueia a incidência direta de sol em toda a extensão do modelo de estudo, e com isso a interferência na operação de cortinas é menor, sendo nulo quando essa obstrução está mais para o sul, na avaliação da fachada leste. Essa obstrução gerou um impacto mais significativo quando a volumetria maior dessa obstrução está localizada ao norte do modelo de estudo, pois os resultados demonstraram uma redução de 40% no tempo em que o sistema de proteção solar interno foi considerado fechado. Essa obstrução também apre-

sentou impacto significativo quando a volumetria de maior altura do conjunto estava localizada a leste do modelo de estudo – cenário de avaliação da orientação norte, em que os resultados demonstraram que a presença desse volume reduziu em 30% o tempo em que o sistema de proteção solar interno foi considerado fechado. O percentual do tempo máximo em que a malha central (malha a que os pontos de avaliação pertencem) apresenta, pelo menos, cinco pontos do grupo de controle com $DA_{(1000)}$ quando considerada apenas a radiação direta (critério para fechamento do sistema de proteção interno de acordo com o IES-LM83) pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Maiores resultados de $DA_{(1000)}$ para, pelo menos, cinco pontos de análise por grupo de controle

		Sem obstrução	Obstrução 1	Obstrução 2
Norte	TL 88%	41%	22%	28%
	TL 30%	30%	14%	17%
Sul	TL 88%	3%	3%	3%
	TL 30%	1%	1%	1%
Leste	TL 88%	27%	19%	27%
	TL 30%	20%	12%	20%
Oeste	TL 88%	31%	16%	19%
	TL 30%	23%	12%	13%

Fonte: Elaborado pela autora

Os resultados de incidência direta de sol demonstram a importância de divisão dos elementos de proteção interna e conforme as avaliações de incidência direta de radiação a fim de avaliar e otimizar o aproveitamento de luz natural no interior dos ambientes. O método de avaliação da IES menciona que cada malha não deve ultrapassar 929 m² e que a iluminância de 1000 lux deve ser atendida em, pelo menos, cinco pontos para ser acionado o sistema de proteção interno, o qual deve ser dividido por orientação solar. Neste estudo os maiores grupos

de controle apresentam área de 144 m² e de 163 m², bem inferiores à área limite estabelecida, e os resultados evidenciam a importância de os grupos de controle que fazem divisa com outras fachadas apresentarem limites máximos de distância em relação à periferia e a relevância de eles serem distribuídos de acordo com a influência do entorno. Comparando-se o resultado do percentual do tempo obtido de radiação direta na malha de avaliação norte, do cenário sem obstrução, com os resultados do estudo de Nezamdoost, Mahic e Wymelemberg (2014), mencionado no capítulo 2 deste trabalho, (no qual também foi avaliado sem obstrução e considerado o impacto da operação de cortinas segundo a mesma metodologia da IES para a fachada sul do hemisfério superior (comportamento similar ao da fachada norte do hemisfério inferior), o resultado foi superior. O percentual do tempo em que a fachada avaliada do estudo citado permaneceu fechada, considerando a metodologia do IES LM83, foi de 29%, sendo esse um tempo inferior ao encontrado neste estudo, em que o sistema interno permaneceu fechado por um tempo maior (41% do tempo), quando considerado cenários sem obstruções frontais. O estudo mencionado analisou o comportamento de um escritório nos Estados Unidos (latitude de 43.6150° N e longitude de 116.2023° O), que apresenta me-

nor penetração de radiação direta no interior da edificação do que um ambiente na cidade de Porto Alegre.

Excluindo-se a operação de cortinas e considerando-se a presença da obstrução frontal 1, no cenário de TL de vidro igual a 88%, todos os pontos de avaliação atendem a uma autonomia de 300 lux para, no mínimo, 50% do tempo em todas as orientações solares avaliadas, mesmo considerando a presença dessa obstrução. No entanto, embora atenda ao critério avaliado, os pontos de avaliação apresentam redução dos valores de $DA_{(300)}$. Para essa TL de vidro, as reduções máximas são de 40%, redução no último ponto de avaliação da orientação norte, sendo o valor de redução nesse ponto de 32% e 36%, quando consideradas as orientações leste e oeste respectivamente. As reduções do ponto 1,65 m e do ponto 3,85 m são de 31% e 36% para a orientação norte, de 22% e 20% para a orientação leste, e de 21% e 31% para oeste. No que diz respeito às reduções de $DA_{(300)}$ no cenário avaliado com vidros cuja TL é de 60%, as reduções dos resultados são em torno de 30% para o ponto 1,65 m e para o ponto 2,75 m nas orientações norte e leste; o valor de redução do ponto 3,85 m e do ponto 4,95 m é de 44% e 42%, respectivamente, na orientação norte, e de 47% e 36% na orientação leste. A orientação oeste apresenta uma redução menor

no ponto 1,65 m, 24%, e maior no ponto 2,75 m e do 3,85 m, sendo respectivamente de 41% e 48%. No cenário de vidros com TL de 40%, os resultados de $DA_{(300)}$ são reduzidos em, pelo menos, 50% a partir do ponto 2,75 m para as orientações norte, leste e oeste; no entanto as reduções do ponto 3,85 m e do 4,95 m são superiores para a orientação norte. O ponto 1,65 m apresenta redução de 36%, 24% e 39%, respectivamente, para as orientações norte, leste e oeste. No cenário de vidros com TL de 30%, os resultados de $DA_{(300)}$ já apresentam diminuição de, no mínimo, 50% a partir do ponto 1,65 m, nas orientações norte e oeste, e redução de 42% nesse mesmo ponto na orientação leste (Tabela 10). É possível perceber que o percentual de redução dos resultados de $DA_{(300)}$ do ponto 1,65 m são próximos do resultado da redução do ponto 4,95 m do cenário sem obstrução frontal.

Tabela 10 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro com a presença da obstrução frontal 1

		Ponto 0,55 m	Ponto 1,65 m	Ponto 2,75 m	Ponto 3,85 m	Ponto 4,95 m
Norte	TL 88%	0	31	34	36	40
	TL 60%	2	32	33	44	42
	TL 40%	9	36	50	75	83
	TL 30%	13	56	60	66	-
Leste	TL 88%	0	22	21	20	32
	TL 60%	0	31	30	47	36
	TL 40%	2	24	50	50	57
	TL 30%	6	42	60	75	0
Oeste	TL 88%	1	21	27	31	36
	TL 60%	0	24	41	48	33
	TL 40%	5	39	58	64	56
	TL 30%	8	50	69	50	100

Fonte: Elaborado pela autora

Na presença da obstrução 2, com vidro cuja TL é de 88%, o ponto 2,75 m começa a apresentar redução mais significativa nos resultados de $DA_{(300)}$, ao passo que, na presença da obstrução 1, isso acontecia a partir do ponto 1,65 m. Todavia a redução chega a aproximadamente 40% no ponto 4,95 m para as duas obstruções quando considerada essa mesma orientação solar. Os pontos de avaliação para a orientação leste também começam a apresentar redução nos valores de $DA_{(300)}$ a partir do ponto 2,75 m e, quando considerada a orientação oeste, a partir do ponto 1,65 m (Tabela 11).

Tabela 11 - Valores de percentual de redução de $DA_{(300)}$ devido à operação de cortinas de acordo com a orientação solar e a TL do vidro com a presença da obstrução frontal 2

		Ponto 0,55 m	Ponto 1,65 m	Ponto 2,75 m	Ponto 3,85 m	Ponto 4,95 m
Norte	TL 88%	0	3	24	37	39
	TL 60%	1	23	33	36	42
	TL 40%	9	30	38	33	22
	TL 30%	15	26	23	82	60
Leste	TL 88%	0	2	20	32	37
	TL 60%	1	15	31	40	41
	TL 40%	4	28	37	50	25
	TL 30%	12	32	43	83	100
Oeste	TL 88%	0	12	24	25	28
	TL 60%	1	19	23	27	26
	TL 40%	11	20	25	26	18
	TL 30%	13	20	29	17	-

Fonte: Elaborado pela autora.

Uma vez que essa obstrução impactou menos o fechamento do sistema de proteção solar interno, os resultados de

redução de $DA_{(300)}$ foram maiores do que os de redução de $DA_{(300)}$ ocasionada pelo impacto da operação de cortinas em função da obstrução 1. A redução dos valores de $DA_{(300)}$ para o ponto 1,65 m, por exemplo, foi de 3% e 26% para a orientação norte para TL iguais a 88% e 30%, respectivamente e, com a presença da obstrução 1, esses valores foram de 31% e 56%.

Para que sejam criados ambientes no pavimento tipo inferior do modelo de estudo que atendam à premissa de $DA_{(300,50\%)}$ para, pelo menos, 55% da área de ambiente, a profundidade dos ambientes é alterada para atender a esse requisito quando as cortinas não são operadas, pois, diferentemente do comportamento do pavimento superior em que todos os pontos apresentam, pelo menos, 50% do tempo com autonomia de 300 lux, no pavimento inferior esse requisito não é atendido em todos os pontos e os ambientes apresentam restrições de profundidade de modo que possam atender a essa premissa. Para verificar o impacto da operação de cortinas na configuração de ambientes no pavimento inferior do modelo de estudo, foram comparadas as profundidades possíveis de configuração de ambientes quando não considerada essa operação para as três orientações que são impactadas por essa medida: norte, leste e oeste. Os resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos avaliados perpendi-

culares à orientação sul não foram alterados, pois, como visto anteriormente, o sistema permanece fechado por um período praticamente insignificante. Na presença da obstrução 1 e da TL de 40% e 30%, a profundidade de ambiente – a fim de atender aos requisitos da IES – não é alterada para as orientações leste e oeste, pois a premissa de $DA_{(300,50\%)}$ foi atingida apenas no ponto 0,55 m e, mesmo sem considerar a operação de cortinas, essa premissa segue sendo atendida apenas no ponto 0,55 m. A operação de cortinas impactou os resultados de ambientes direcionados para o norte no cenário de TL igual a 40% quando avaliados com a presença da obstrução 1; nesse caso, quando excluída a operação de cortinas, é possível configurar um ambiente de 3 m de profundidade, passando essa distância para 1 m na presença dessa operação. No caso do vidro com TL de 60%, a profundidade de ambientes de modo a atender ao requisito aceitável da IES também é alterada para as orientações norte e oeste em que a profundidade máxima passa de 3 m para 5 m quando excluída a operação de cortinas e considerada a presença da obstrução 1. Em situações em que a TL de vidro é de 88%, a modificação dessa medida altera a profundidade possível de ambientes de 5 m para 9 m nas orientações norte, leste e oeste; no entanto, como todos os pontos atendem ao requisito quando as cortinas não são acionadas, não foi possível identificar se

as orientações solares apresentaram impactos diferentes nos resultados de profundidade limite de ambientes (Tabela 12).

Tabela 12 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1

	Operação de cortinas	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	sim	5 m	3 m	1 m	1 m
	não	9 m ³⁰	5 m	3 m	1 m
Leste	sim	5 m	3 m	1 m	1 m
	não	9 m ³⁰	3 m	1 m	1 m
Oeste	sim	5 m	3 m	1 m	1 m
	não	9 m ³⁰	5 m	1 m	1 m

Fonte: Elaborado pela autora.

³⁰ Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.

Na avaliação da criação de ambientes no pavimento tipo inferior do modelo de estudo a fim de atender à premissa de $DA_{(300,50\%)}$ para, pelo menos, 75% da área de ambiente, o impacto da operação de cortinas influencia o resultado; entretanto, quando considerada a presença da obstrução 1, mesmo sem o acionamento de cortinas, não se torna possível a configuração de ambientes com vidros cuja TL é igual a 40% e 30%. A configuração de ambientes direcionados para o norte e o oeste sem a operação de cortinas no cenário de TL de 60% é viável; no entanto o resultado, mesmo sem considerar essa operação, ainda apresenta grande restrição de profundidade, sendo possível a configuração de ambientes de apenas de 3,67 m. A viabilidade de criação de ambientes fica mais evidente com o uso de TL de 88%, já que a alteração dessa medida permitiu a configuração de ambientes com 6,60 m para o norte, leste e oeste (Tabela 13).

Tabela 13 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 1

	Operação de cortinas	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	sim	3,67 m	2,20 m	-	-
	não	6,60 m ³¹	3,67 m	2,20	-
Leste	sim	3,67 m	2,20 m	-	-
	não	6,60 m ³¹	2,20 m	-	-
Oeste	sim	3,67 m	2,20 m	-	-
	não	6,60 m ³¹	3,67 m	-	-

Fonte: Elaborado pela autora.

³¹ Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.

Na presença da obstrução 2 (obstrução que não demonstrou impacto significativo nos resultados de $DA_{(300)}$ quando comparada com o cenário sem obstrução), a exclusão da operação de cortinas no cenário de TL igual a 30% viabiliza a configuração de ambientes direcionados para o leste; na presença dessa operação, a configuração de ambientes apresentava um limite de profundidade de apenas 1 m de distância em relação à fachada para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$. Com essa mesma TL de vidro, os resultados para as orientações norte e oeste permaneceram iguais. A avaliação da TL de 40% direcionada para essa mesma obstrução altera o limite de profundidade de 3 m para 5 m se as cortinas não forem acionadas. No cenário de TL de vidro de 60%, essa distância em relação à fachada passa de 5 m para 9 m, quando considerada a malha direcionada para o norte, e de 5 m para 7 m, quando considerada a malha direcionada para leste e oeste. Por fim, se a TL de vidro for de 88%, a exclusão da operação de cortinas nas simulações altera a profundidade possível de ambientes para atendimento do critério avaliado de 7 m para 9 m para as orientações norte e leste e não impacta os resultados de profundidade de ambientes direcionados para o oeste, pois, para essa orientação, mesmo com a

operação de cortinas no cenário de presença dessa obstrução, todos os pontos apresentaram $DA_{(300)}$ com resultado superior a 50% (Tabela 14).

Tabela 14 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 55\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2

	Operação de cortinas	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	sim	7 m	5 m	3 m	3 m
	não	9 m ³²	9 m ³²	5 m	3 m
Leste	sim	7 m	5 m	3 m	1 m
	não	9 m ³²	7 m	5 m	3 m
Oeste	sim	9 m ³²	5 m	3 m	3 m
	não	9 m ³²	7 m	5 m	3 m

Fonte: Elaborado pela autora.

³² Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.

Quando essa avaliação é realizada na presença da obstrução 2, que exerce menor influência nos resultados de $DA_{(300)}$ em relação ao cenário sem obstrução, a exclusão da operação de cortinas já viabiliza a configuração de ambientes para as três orientações no cenário com TL de 40%, mas com limite de profundidade de 3,67 m. No cenário de TL de 60% e 88%, todas as orientações, na ausência da operação de cortinas, apresentam aumento no limite da profundidade dos ambientes (Tabela 15).

Tabela 15 - Profundidade estimada de ambiente para atendimento de $sDA_{(300,50\%)} > 75\%$ de acordo com a orientação solar e a TL de vidro para o quarto pavimento da edificação de estudo com a obstrução frontal 2

	Operação de cortinas	TL 88%	TL 60%	TL 40%	TL 30%
Norte	sim	3,85 m	2,75 m	2,20 m	2,20 m
	não	6,60 m ³³	6,60 m	3,67 m	2,20 m
Leste	sim	3,85 m	3,67 m	2,20 m	-
	não	6,60 m	5,13 m	3,67 m	2,20 m
Oeste	sim	6,60 m ³³	3,67 m	2,20 m	2,20 m
	não	6,60 m ³³	5,13 m	3,67 m	2,20 m

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados comprovam a importância da consideração da presença de cortinas assim como do entorno existente nas avaliações a fim de quantificar a presença de luz natural no interior dos ambientes. Os resultados também evidenciam a dificuldade de obtenção de $sDA_{(300,50\%)}$ em ambientes que sofrem impacto significativo do entorno com TL inferiores a 88% e para ambientes com impacto menor do entorno, como o gerado pela obstrução 2, com TL inferiores a 60%.

³³ Todos os pontos apresentam atendimento de $DA_{(300,50\%)}$ de modo que podem ser configurados ambientes com profundidade superior.



CAPÍTULO 05

Conclusões

Conclusões

Mesmo que a importância da luz natural na saúde e no bem-estar das pessoas já seja um fato conhecido e comprovado, ainda existe dificuldade de garantir que critérios mínimos de luz natural sejam alcançados através de normas e recomendações nacionais, uma vez que no Brasil ainda não existe normas com critérios mínimos de iluminação natural para edifícios comerciais. Estudos de avaliação de luz natural com o emprego de vidros comuns, TL 88%, não podem ser utilizados como referência para o desenvolvimento de projetos de edificações comerciais de pele de vidro na cidade de Porto Alegre. O clima local exige a utilização de vidros com proteção térmica em edificações com esse padrão construtivo (pele de vidro), pois a produção de uma arquitetura sustentável não é uma escolha, mas sim uma condição básica da boa arquitetura principalmente no cenário do aquecimento global em curso no século XXI. Os resultados deste estudo demonstraram o impacto na autonomia de luz natural no interior dos ambientes à medida que é reduzida a TL dos vidros. Comprovaram ainda que esse impacto é mais acentuado na presença de obstruções e quando considerada a

operação de cortinas, sendo que esses elementos são fundamentais na avaliação a fim de garantir qualidade no interior dos ambientes. Os resultados também apontaram que, na utilização de vidros comuns (TL de 88%), a operação de cortinas não impacta de forma significativa os resultados, não apresentando praticamente redução no tempo total com autonomia de 300 lux nos pontos de avaliação; no entanto, à medida que a TL do vidro é reduzida, o impacto é mais significativo, o que acentua a importância de estudos que considerem diferentes TL de vidros. Isso acontece porque a presença do entorno, assim como a presença do sistema de proteção solar interno fechado (cortinas ou persianas), acarretam uma grande redução da luz natural que chega no interior do pavimento, que somado ao uso de vidros com TL baixa não permite a passagem de luz necessária de forma a garantir uma iluminância de 300 lux. O que não ocorre com o uso de vidros comuns (TL=88%) que mesmo com a presença do entorno e com o uso do sistema de proteção solar interna ainda permite uma passagem de luz suficiente de forma a atender aos requisitos de luz natural definidos como aceitável pelo IES, abordados neste trabalho.

De modo a atender aos critérios mínimos de luz natural consideradas neste estudo, faz-se necessário que avaliações de

luz natural sejam realizadas na etapa inicial do desenvolvimento do projeto em conjunto com avaliações de conforto térmico e de eficiência energética. Com isso, os resultados podem auxiliar no desenvolvimento de estratégias arquitetônicas de modo a responder as necessidades específicas do clima e do entorno do local. Ou seja, deve ser realizado um projeto integrado desde a etapa de conceito do projeto para otimizar a qualidade interna dos ambientes na qual o emprego das diretrizes arquitetônicas corretas apresenta um papel fundamental. As avaliações com diferentes transmitâncias luminosas de vidros realizadas neste estudo demonstraram a importância de essa variável ser considerada ainda no desenvolvimento inicial do projeto, de forma que estratégias arquitetônicas de alterações volumétricas e de fachada possam ser implementadas em fase inicial do desenvolvimento do projeto, de modo a garantir o atendimento de critérios mínimos de qualidade no interior dos ambientes. O desenvolvimento de uma arquitetura sem essas avaliações em etapa inicial pode estar concebendo ambientes carentes de luz natural, uma vez que as características dos vidros podem ser escolhidas sem ser considerado critérios mínimos de qualidade de luz natural para a edificação, pois ainda não existem normas nacionais com critérios mínimos para esse tema.

Com isso, projetos que consideram apenas critérios relacionados à eficiência energética (como o Selo PROCEL e a Certificação LEED), uma vez que não apresentam requisitos obrigatórios relacionados à iluminação natural, podem estar prejudicando a qualidade do interior dos ambientes do ponto de vista de qualidade de iluminação natural, já que a busca por eficiência pode influenciar a utilização de vidros com grande proteção térmica, o que reduz consequentemente a transmitância luminosa dos vidros – mesmo em vidros com espectro seletivo – em prol de maior eficiência energética para a edificação. Além disso, quanto maior o índice de seletividade do vidro, característica que permite maior passagem de luz e menor fluxo de calor, maior o custo do vidro; em virtude disso, muitas vezes pode ser negligenciada por parte dos investidores a importância da compra de vidros com maior índice de seletividade, o que acaba acarretando o não atendimento de critérios mínimos de qualidade de luz natural para os usuários. Logo, são necessários requisitos mínimos nacionais de iluminação natural nos edifícios comerciais, sendo incabível existirem requisitos de eficiência sem que haja um critério mínimo de qualidade, que é um aspecto que influencia a saúde das pessoas. Também é preciso que os projetistas especifiquem características mínimas de TL de vidros para os seus projetos de modo a garantir critérios

mínimos de qualidade de luz natural no interior dos ambientes projetados.

A linguagem arquitetônica avaliada neste trabalho, edifícios em altura com envidraçamento total (sendo esta a linguagem arquitetônica mais característica das novas construções de edifícios comerciais da cidade), as chamadas caixas de vidro, demonstrou dificuldade de atendimento do requisito definido pelo IES como desejável para edificações. Tendo em vista as características do clima da cidade de Porto Alegre, não faz sentido construir arquiteturas com a materialidade de pele de vidro para orientações que promovem grande incidência direta de sol, pois, como demonstrado, o sistema de proteção solar interno permanece um grande período do dia fechado e prejudica a iluminação natural no interior dos ambientes. A comparação dos resultados com e sem operação de cortinas e o tempo aproximado em que o sistema é considerado para cada orientação solar atestam a necessidade do dimensionamento de proteções solares externas à edificação, de modo a controlar a incidência direta de sol e a viabilizar um maior período com o sistema de proteções solares internas aberto e conseqüentemente mais luz natural no interior dos ambientes. Fica evidente a necessidade de diferenciação na materialidade da arquitetura de modo a

responder às demandas de qualidade e de eficiência, não só em relação às fachadas, mas também em relação à altura do pavimento na edificação, de forma que a arquitetura possa responder e atender a critérios de qualidade em todos os pavimentos. Além disso, os resultados confirmaram a necessidade de utilização de outras estratégias arquitetônicas além das proteções solares – como prateleira de luz, pés-direitos maiores, etc. –, com o objetivo de proporcionar maior iluminação natural no interior dos ambientes quando considerada a presença de obstruções. Essa relevância se deve ao fato de o estudo ter demonstrado que a configuração de ambientes não é possível de modo a atender aos critérios mínimos de qualidade avaliados por este trabalho na linguagem arquitetônica estudada (fachadas totalmente envidraçadas e sem elementos de proteção solar) e na presença de algumas obstruções, a não ser que sejam utilizados vidros com TL de 88%, característica não viável para utilização em projetos desenvolvidos na cidade de Porto Alegre na linguagem arquitetônica estudada nesse trabalho, em razão de seu clima.

Além disso, é imprescindível que as avaliações de autonomia de luz natural visando definir as características dos vidros e garantir critérios mínimos de qualidade para os usuários sejam conduzidas levando em conta o uso de proteções solares inter-

nas (uma vez que, em edifícios comerciais, esse sistema é fechado na presença de incidência direta de sol devido a questões de conforto visual) e considerando o entorno do local. As avaliações de autonomia de luz natural realizadas neste trabalho de acordo com as orientações do IES (que definem como padrão a consideração do uso de cortinas) apresentaram resultados bem inferiores se comparadas a situações em que não foram operadas as cortinas, sendo importante que sejam avaliados cenários em que essa operação é considerada, pois ela influencia na quantidade de luz natural no interior dos ambientes na presença de incidência direta de sol. E, como mencionado anteriormente, o impacto dessa operação é mais acentuado na presença de obstruções e à medida que é reduzida a TL dos vidros. Os resultados apontaram que o impacto dessa operação é mais acentuado quando utilizados vidros de TL baixos (40% e 30%), pois a luz que passa pelo vidro já é bem reduzida e, quando aplicado o fator de redução que simula a presença de cortinas, esse valor torna-se ainda menor. O impacto da operação de cortinas deve ser entendido de acordo com a orientação solar, pois, devido ao fato de a incidência direta de sol influenciar negativamente os resultados de autonomia de luz natural, as fachadas que recebem mais radiação solar ostentam menores valores de DA(300,50%). Com isso a orientação sul passa a ser a orientação

com melhores resultados de autonomia de luz natural quando considerado o uso de cortinas; sem essa consideração, a orientação norte é a que assume essa condição.

Na presença de obstruções, foi atestada a diferença dos resultados de autonomia de luz natural com e sem a presença do entorno, demonstrando a importância de a avaliação dos requisitos mínimos de qualidade ser conduzida, pelo menos, por pavimento em edifícios sem compartimentos. No caso de salas divididas, é fundamental que essa avaliação seja realizada por sala, para que se garanta o mesmo objetivo. O estudo demonstrou também que a obstrução que apresenta maior taxa de ocupação e menor altura revela maior redução na autonomia de luz natural nos pontos de avaliação do modelo de estudo quando comparada com os resultados obtidos com a presença da obstrução que apresenta uma volumetria com menor TO e maior altura. As diferenças da influência do entorno que variaram conforme a posição da quadra comprovaram a importância da utilização de ferramentas de simulação para aprovação de projetos com vistas a garantir qualidade, uma vez que regras de limites de altura podem não assegurar qualidade, pois edificações mais baixas podem obstruir mais a penetração de luz natural, como demonstrado neste estudo. A certificação LEED, embora utilize

os critérios do IES (critérios mais recentes de avaliação de qualidade de luz natural), demonstrou ser falha, pois não exige que a avaliação seja realizada por pavimento da edificação e com isso não garante que os critérios sejam atendidos nos pavimentos inferiores que são aqueles que recebem mais influência do entorno. Nesse contexto, a certificação WELL é mais completa, pois exige avaliação por pavimento para atendimento do critério. Os resultados deste estudo deixaram evidente que critérios de limitação de área mínima de abertura (como mencionado no código de obras da cidade e na certificação WELL, na qual é mencionado como critério mínimo) para atendimento dos critérios do IES relacionados à iluminação natural não são suficientes. A fim de garantir iluminação natural nos ambientes através de área mínima de janela, deve ser definido, pelo menos, algum requisito relacionado à TL mínima para os vidros. Por exemplo, as avaliações do pavimento tipo do modelo de estudo demonstraram que o critério antigo de TL mínima para vidros de 40% presente na versão inicial da certificação WELL garantiu o atendimento do requisito definido como aceitável pelo IES para o modelo de estudo, já assegurando uma qualidade mínima de autonomia de luz natural.

Espera-se que o trabalho desenvolvido possa contribuir para que a antiga, porém ainda necessária, discussão sobre a produção arquitetônica contemporânea que utiliza fachadas envidraçadas seja renovada, bem como para que a academia continue pesquisando e divulgando estratégias sustentáveis de construção. O desenvolvimento de um conceito arquitetônico com o objetivo de otimizar e garantir a luz natural no interior dos ambientes é fundamental para o atendimento dos critérios avaliados nesse trabalho.

Recomenda-se para futuras pesquisas, as avaliações de:

- **Avaliação de variações de altura de pé-direito e diferentes valores de refletâncias dos revestimentos internos.**

De modo a explorar outras variáveis na linguagem arquitetônica, estudada nesse trabalho (pele de vidro), que impactam na autonomia de luz natural, sugere-se a avaliação do impacto de alterações na altura do pé-direito dos pavimentos e nos valores de refletâncias dos revestimentos internos .

● **Avaliação de outros intervalos de iluminância**

Não foram avaliados os impactos das análises em outros intervalos de iluminâncias, pois o objeto deste estudo foi a avaliação do atendimento do requisito da IES e das suas recomendações de acordo com o IES-LM 83, que é utilizado como método de avaliação de qualidade de iluminação natural das certificações LEED e WELL. No entanto, a IES menciona, na padronização desse método de análise, que as pesquisas para verificar os limites definidos como preferíveis e aceitáveis foram baseadas em estudos realizados na América do Norte entre as latitudes 37° e 48°, sendo recomendadas avaliações em outras latitudes. Além disso, na revisão da literatura, foram encontradas, como recomendações de avaliação, iluminâncias entre 100 lux e 3.000 lux, tendo como justificativa a flexibilidade crescente das estações de trabalho com área de transição. Com isso, sugere-se, para pesquisas futuras, a análise do método de avaliação do requisito obrigatório da certificação WELL via processo de simulação, que consiste na avaliação da autonomia de luz natural de 200 lux para 40% do tempo ($DA_{(200,40\%)}$) para, no mínimo, 30% da área dos ambientes com ocupação regular. Todavia, diferentemente da certificação WELL, que permite essa avaliação do requisito obrigatório para a área inteira do edifício, se

faz necessário a análise por pavimento para que seja garantido esse critério mínimo também nos pavimentos inferiores.

● **Análise com diferentes tipos de proteção solar interna (cortinas)**

Sabe-se que há um novo programa desenvolvido pela Solemma em 2021, que permite a avaliação de autonomia de luz natural conforme a metodologia da IES, considerando diversos tipos de cortina que apresentam diferentes tipos de perfuração; esta é uma medida que pode ser avaliada no impacto dos resultados. Porém, não houve possibilidade de inseri-la a tempo nesta pesquisa.

● **Avaliação de luz integrativa**

Como perspectiva para futuros estudos, sugere-se ainda a avaliação do impacto das diferentes transmitâncias luminosas de vidro e da operação de cortinas nos resultados de luz integrativa (também conhecida como iluminação centrada no usuário ou iluminação circadiana). Essa avaliação é realizada em pontos verticais na altura dos olhos de usuários considerados sentados, de modo a quantificar o quão prejudicial para saúde

são as edificações de pele de vidro que, por não apresentarem tratamento de fachada para proteger a incidência direta de sol, necessitam do fechamento do sistema de proteção interno por parte dos usuários e também, por demandarem controle de eficiência e conforto térmico, precisam utilizar vidros com grande proteção térmica que, na grande maioria das vezes, apresentam valores de transmitância luminosa reduzidas. Existem programas que já realizam esses cálculos analisando a iluminância vertical que chega à altura dos olhos, e existem métricas de avaliação que permitem quantificar se essa iluminância é adequada.

Referências

ABNT. **ABNT NBR 15220 – Desempenho térmico das edificações Parte 3: zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares e de interesse social.** 2005. Disponível em: <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=635>. Acesso em: 10 jan. 2021.

AI,Q. **The impact of overhang length, window orientation, and climate on spatial daylight autonomy (sDA) and annual sunlight exposure (ASE) for a classroom.** 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual da Pensilvânia, USA, 2016. Disponível em: https://etda.libraries.psu.edu/files/final_submissions/12468. Acesso em: 23 jan. 2021.

ANALYSIS SOL-AR. Versão 6.2. 2009 [s.l.]: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade de Santa Catarina. 2020.

BEAUDOIN, L. **Healthier office, happier workforce, greater productivity.** CBRE group. Disponível em: <https://www.cbre.rs/en/global/agile-real-estate/healthier-office-greater-productivity?article=%7B96fc9853-0ae8-453f-9f00-e7b7dbd091b3%7D&feedid=064af4d2-c485-45be-9744-afa7ca45de52>. Acesso em: 15. nov. 2020.

BELTRAN, L.O.; LIU, D. Evaluation of dynamic daylight metrics: based on weather, location, orientation and daylight availability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 35., 2020, Coruña. **Anais** [...]. Coruña: Universidade de Coruña, 2020. v. 2, p. 1083-1088. Disponível em: <https://oaktrust.library.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/188889/1460-Liliana%20Beltran.pdf?sequence=4&isAllowed=y>. Acesso em: 23 jan. 2021.

BRAGANÇA, L.; VIEIRA, S. M.; ANDRADE, J. B. Early stage design decisions: the way to achieve sustainable buildings at lower costs. **The Scientific World Journal**, v. 2014, jan. 2014. Disponível em: <https://downloads.hindawi.com/journals/tswj/2014/365364.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2021

BENTES, B. B. R. **O uso do vidro como um signo de distinção arquitetônica**: estudo de fachadas em edificações em Belém. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, 2018. Disponível em: <https://ppgau.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/2018/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20-%20Bernadeth%20Beltr%C3%A3o%20Rosas%20Bentes.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2021.

BRUGNERA, R. R.; MATEUS, R.; ROSSIGNOLO, J. A.; CHVATAL, K. M. S. Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 3, p. 295–315, jul./set. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/jj/ac/a/ZkfrnjcwVwLkhzV6PCx9mPD/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 dez. 2021

CAVALERI, M. P. M.; CUNHA, R. M. C.; GONÇALVES, J. C. S. Iluminação natural em edifícios de escritórios: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 1, p.19-34, mar. 2018. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/parc/article/view/8650725>. Acesso em: 15 ago. 2021.

DU, T.; JANSEN, S. C.; TURRIN, M.; DOBBELSTEEN, A. van den. Impact of space layout on energy performance of office buildings coupling daylight with thermal simulation. **E3S WEB of Conferences**, v. 111, mai. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/335141561_Impact_of_space_layout_on_energy_performance_of_office_buildings_coupling_daylight_with_thermal_simulation. Acesso em: 13 jun. 2021

FRAMPTON, K. (1980). **História crítica da arquitetura moderna**. Tradução: JL Camargo. São Paulo: Martins Fontes, 2015.

GBC BRASIL (Green Building Council Brasil). **Brasil ocupa 4º. lugar no ranking mundial de construções sustentáveis certificadas pela ferramenta internacional LEED**. São Paulo, 18 jan. 2018. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/reflexao-especular-difusa.htm>. Acesso em: 16 dez. 2019.

GBIG (Green Building Information Gateway) U.S. GREEN BUILDING COUNCIL., 2021a. **GBIG Advanced Search**. Disponível em: http://www.gbig.org/search/advanced/map_tab?search%5Bactivity_brand_id%5D=1&search%5Bcertified_if_leed%5D=true. Acesso em: 3 abr. 2021.

GBIG (Green Building Information Gateway) U.S. GREEN BUILDING COUNCIL., 2021b. **Activities LEED**. Disponível em: http://www.gbig.org/activities/featured?picker_item_id=23&selected_activity_brand=Certification%2F%2F23&selected_category=Certification. Acesso em: 3 abr. 2021.

GONÇALVES, J. et. al. Desempenho ambiental dos escritórios em caixa de vidro: uma visão geral (parte 01/08). **Vitruvius**, São Paulo, v. 21, n. 158.08, nov. 2020. Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/drops/21.158/7926>. Acesso em: jun. 2021

GUZOWSKI, M. **Daylight for sustainable design**. New York: McGraw-Hill Professional, 2010.

HAZBOUN, V. D. **Desempenho da luz natural em ambientes com aberturas voltadas para leste considerando a influência dos usuários**. 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, 2018. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/25665/1/DesempenhoLuzNatural_Hazboun_2018pdf. Acesso em: 11 jun. 2021

HUANG, Y.; NIU, J. Optimal building envelope design based on simulated performance: history, current status and new potentials. **Energy and Buildings**, v. 117, p. 387–398, abr. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778815302668?via%3Dihub>. Acesso em: 19 dez. 2021

IES (Illuminating Engineering Society). **Approved method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)**, IES LM-83-12. 1. ed. New York, NY: IES, 2012.

IES (Illuminating Engineering Society). **IES Lighting handbook**. 10. ed. New York, NY: IES, 2010.

IWBI (International Well Building Institute). **The WELL light concept**. New York, 2021a. Disponível em: <https://v2.wellcertified.com/wellv2-3/en/light>. Acesso em: 20 mar. 2021.

IWBI (International Well Building Institute). **WELL certification**. New York, 2021. Disponível em: <https://www.wellcertified.com/certification/v2/>. Acesso em: 20 mar. 2021b.

IWBI (International Well Building Institute). **The WELL certification standard**. New York, 2021. Disponível em: <https://v2.wellcertified.com/en/wellv2/concepts/>. Acesso em: 20 mar. 2021c.

LARANJA, A. C.; CABÚS, R. C.; ALVAREZ, C. E. de; CORREIA, L. G.. Análise das relações entre a geometria urbana e a orientação das aberturas na disponibilidade de iluminação natural no ambiente interno. **Cadernos de Arquitetura e Urbanismo**, Belo Horizonte, v. 20, n. 26, p. 151-167, 1 sem. 2013. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/grupopesquisa/grilu/Artigos/An%C3%A1lise%20das%20Rela%C3%A7%C3%B5es%20entre%20a%20Geometria%20Urbana%20e%20a%20Orienta%C3%A7%C3%A3o%20das%20Aberturas%20na%20Disponibilidade%20de%20Ilumina%C3%A7%C3%A3o%20Natural%20no%20Ambiente%20Interno.pdf>. Acesso em: 18 out. 2021

LOBOS, D.; DONATH, D. O problema da distribuição espacial na arquitetura: Pesquisa e reflexões. **Arquiteturarevista**, v. 6, n. 2, p. 136-161, jul./dez. 2010. Disponível em: <http://revistas.unisinos.br/index.php/arquitetura/article/view/4554/1785>. Acesso em: 14 jun. 2021

MAIOLI, R. N.; BARROS, M. C. de S. L. S. B.; BARROS, J. D. P. de.; MOÇA, I. F. F; CONINCK, I. M.; PAGEL, E. C. A transformação da fachada na tipologia construtiva de edifícios comerciais verticais em Vitória-Es e sua relação com o conforto ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/341525202_A_TRANSFORMACAO_DA_FACHADA_NA_TIPOLOGIA_CONSTRUTIVA_DE_EDIFICIOS_COMERCIAIS_VERTICAIS_EM_VITORIA-ES_E_SUA_RELACAO_COM_O_CONFORTO_AMBIENTAL. Acesso em: jun. 2021

MARDALJEVIC, J. Simulation of annual daylighting profiles for internal illuminance. **Lighting Research and Technology**, v. 32, n. 3, p. 111-118. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1177%2F096032710003200302>. Acesso em: 7 jul. 2020.

MARDALJEVIC, J.; NABIL, A. Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. **Lighting Research and Technology**, v. 37, n. 1, p. 41-59. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1191/1365782805li128oa>. Acesso em: 7 jul. 2020.

NEZAMDOOST, A.; MAHIC, A.; WYMELEMBERG, K. van den. Annual energy and daylight impacts of three manual blind control algorithms. In: ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY ANNUAL CONFERENCE, 2014, Pittsburgh. **Anais [...]**. Pittsburgh, 2014. Disponível em: <https://>

www.researchgate.net/publication/315664730_ANNUAL_ENERGY_AND_DAYLIGHT_IMPACTS_OF_THREE_MANUAL_BLIND_CONTROL_ALGORITHMS. Acesso em: 21 set. 2021

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação natural em edifícios de escritórios**: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso. 2017. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo (FAUUSP), São Paulo, 2017. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-22062017-155747/publico/DanielaCardosoLaudaresPereira_corrigida.pdf. Acesso em: 17 jun. 2021

PIRES, D. P.; MARTAU, B.T. Critérios de iluminação natural da certificação LEED e desenvolvimento de projetos arquitetônicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARQUITETOS, 21., 2019, Porto Alegre. **Anais** [...]. Porto Alegre: Instituto dos Advogados do Brasil. Disponível em: https://drive.google.com/file/d/1XVfUkKzxAL1vtpHlu5i7GLcZfL6WxGl_/view.

PORTO ALEGRE. **Lei complementar nº 420**: Código de proteção contra incêndio de Porto Alegre. Institui o Código de Proteção contra incêndio de Porto Alegre e dá outras providências. 4. ed. Porto Alegre: CORAG (Assessoria de Publicações Técnicas), 2001. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/smov/usu_doc/incendio.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

PORTO ALEGRE (Secretaria do Planejamento Municipal). **PPDUA – Plano diretor de desenvolvimento urbano ambiental**. Porto Alegre, 1 jul. 2010. Disponível em: http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu_doc/planodiretortexto.pdf. Acesso em: 10 jan. 2020.

PROJETEEE. **Estratégias bioclimáticas**. Florianópolis. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategias-bioclimaticas/>. Acesso em: 15 de abril de 2021.

REINHART, C. **Daylighting handbook II**: daylight simulations dynamic façades. Cambridge, MA: Building Technology Press, 2018.

REINHART, C. **Daylighting handbook I**: Fundamentals designing with the sun. Cambridge, MA. Building Technology Press, 2014.

REINHART, C.; HERKEL, S. The simulation of annual daylight illuminance distributions: a state-of-the-art comparison of six RADIANCE-based methods. **Energy and Buildings**, v. 32, n. 2, p. 167-187, jul. 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778800000426?via%3Dihub>. Acesso em: jun. 2021

SANTOS, I. G. dos; AUER, T.; SOUZA, R. V. G. Optimized indoor daylight for tropical dense urban environments. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 3, p. 87-102, jul./set. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/ZFPJVmDBVhHVvs4p7Yzst7S/abstract/?lang=en>. Acesso em: 16 dez 2020.

SCALCO, V. A.; PEREIRA, F.O. R. Método para a avaliação do impacto de edificações no acesso à iluminação natural em vizinhanças urbanas aplicado em cenários virtuais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2, p. 169–187, abr./jun. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/299339613_Metodo_para_a_avaliacao_do_impacto_de_edificacoes_no_acesso_a_iluminacao_natural_em_vizinhanças_urbanas_aplicado_em_cenários_virtuais. Acesso em: 26 jun. 2021

SILVA, D. C. M. da. Reflexão especular e difusa. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/fisica/reflexao-especular-difusa.htm>. Acesso em: 20 abr. 2021.

SILVA, H. C.; STÜRMER, L. K. Região climática de Porto Alegre: revisão para um desenho inteligente e uma arquitetura adequada. **ARQTEXTO**, v. 9, p. 124-133. 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/22250>. Acesso em: 10 jan. 2020.

TONELLO, G. Luz y salud (una revisión). **Revista Luminotecnia**, n. 129, p. 58-62, set./out. 2015. Disponível em: http://www.editores-srl.com.ar/revistas/lu/129/tonello_luz_y_salud. Acesso em: 10 jun. 2016.

TSAGRASSOULIS, A.; KONTADAKIS, A.; ROETZEL, A. Comparing climate based daylight modelling with daylight factor assessment - implications for architects. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE ARCHITECTURAL SCIENCE ASSOCIATION, 49., 2015, Melbourne. **Anais** [...]. Melbourne: The University of Melbourne, 2015. p. 1097–1106. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/301692277_Comparing_climate_based_daylight_modelling_with_daylight_factor_assessment_-_implications_for_architects. Acesso em: 16 nov. 2019.

TURAN, I.; CHEGUT, A.; FINK, D.; REINHART, C. The value of daylight in office spaces. **Building and Environment**, v. 168, nov. 2019. Disponível em: <https://benny.aeaweb.org/conference/2020/preliminary/paper/B38DenAK>. Acesso em: 14 abril 2020.

USGBC (U.S.Green Building Council). **Reference guide for building design and construction**. LEED v4. Washington, DC. 1 jul. 2014.

USGBC (U.S.Green Building Council). **LEED v4 Building design and construction: getting started guide for beta participants**. Washington, DC. 2018.

WINCHIP, M. S. **Designing a quality lighting environment**. New York: Fairchild Books, 2005.

Apêndice

Tabela 16 - Resultados de $DA_{(300)}$ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo superior (sem a presença de obstruções)

		Operação de cortinas	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Norte	TL 88%	Sim	98	98	97	96	92
		Não	98	97	97	96	95
	TL 60%	Sim	98	97	95	85	73
		Não	98	97	96	94	93
	TL 40%	Sim	97	95	84	65	56
		Não	97	96	94	91	88
	TL 30%	Sim	96	90	71	58	54
		Não	97	95	92	88	85

		Operação de cortinas	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Sul	TL 88%	Sim	98	97	97	96	94
		Não	98	97	97	96	95
	TL 60%	Sim	98	97	95	95	92
		Não	98	97	95	94	93
	TL 40%	Sim	97	95	92	89	87
		Não	97	96	94	92	90
TL 30%	Sim	96	92	89	84	81	
	Não	96	94	90	86	82	
Leste	TL 88%	Sim	98	98	96	95	94
		Não	98	98	97	96	95
	TL 60%	Sim	98	96	94	90	82
		Não	98	97	96	94	93
	TL 40%	Sim	97	95	88	79	68
		Não	97	96	94	91	89
TL 30%	Sim	96	92	81	68	62	
	Não	97	94	91	88	82	
Oeste	TL 88%	Sim	98	97	96	95	93
		Não	98	97	97	96	95
	TL 60%	Sim	98	96	94	88	80
		Não	98	97	95	94	93
	TL 40%	Sim	96	94	87	74	63
		Não	97	95	93	91	89
TL 30%	Sim	96	91	79	65	60	
	Não	96	94	91	88	83	

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 17 - Resultados de DA₍₃₀₀₎ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo inferior com a presença da obstrução 1

		Operação de cortinas	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Norte	TL 88%	Sim	97	60	52	46	39
		Não	97	87	79	72	65
	TL 60%	Sim	94	52	38	22	15
		Não	96	76	57	39	26
	TL 40%	Sim	86	34	10	3	1
		Não	94	53	20	12	6
TL 30%	Sim	80	11	4	1	0	
	Não	92	25	10	3	0	
Sul	TL 88%	Sim	97	81	68	68	62
		Não	97	85	76	68	60
	TL 60%	Sim	96	67	45	38	34
		Não	96	68	50	32	30
	TL 40%	Sim	89	35	14	6	5
		Não	93	35	16	5	5
TL 30%	Sim	85	15	4	1	0	
	Não	88	17	5	0	0	
Leste	TL 88%	Sim	97	64	54	48	41
		Não	97	82	68	60	60
	TL 60%	Sim	96	43	30	18	16
		Não	96	62	43	34	25
	TL 40%	Sim	91	25	9	6	3
		Não	93	33	18	12	7
TL 30%	Sim	81	11	4	1	1	
	Não	86	19	10	4	1	
Oeste	TL 88%	Sim	96	67	55	49	44
		Não	97	85	75	71	69
	TL 60%	Sim	96	52	30	23	26
		Não	96	68	51	44	39
	TL 40%	Sim	89	23	8	5	4
		Não	94	38	19	14	9
TL 30%	Sim	83	10	4	2	0	
	Não	90	20	13	4	1	

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 18 - Resultados de DA₍₃₀₀₎ dos pontos de avaliação para as diferentes TL de vidro com e sem operação de cortinas para o pavimento tipo inferior com a presença da obstrução 2

		Operação de cortinas	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5
Norte	TL 88%	Sim	97	91	68	52	46
		Não	97	94	90	83	76
	TL 60%	Sim	95	71	55	47	29
		Não	96	92	82	74	50
	TL 40%	Sim	86	62	42	18	7
		Não	94	88	68	27	9
TL 30%	Sim	78	58	30	2	2	
	Não	92	78	39	11	5	
Sul	TL 88%	Sim	97	92	87	80	73
		Não	97	94	89	86	77
	TL 60%	Sim	96	67	45	38	34
		Não	96	68	50	32	30
	TL 40%	Sim	89	35	14	6	5
		Não	93	35	16	5	5
TL 30%	Sim	85	15	4	1	0	
	Não	88	17	5	0	0	
Leste	TL 88%	Sim	97	92	70	50	43
		Não	97	94	88	74	68
	TL 60%	Sim	96	77	54	36	26
		Não	97	91	78	60	44
	TL 40%	Sim	90	56	36	10	9
		Não	94	78	57	20	12
TL 30%	Sim	79	45	21	2	0	
	Não	90	66	37	12	1	
Oeste	TL 88%	Sim	97	82	68	62	52
		Não	97	93	89	83	72
	TL 60%	Sim	95	74	62	43	32
		Não	96	91	80	59	43
	TL 40%	Sim	84	65	41	20	9
		Não	94	81	55	27	11
TL 30%	Sim	78	56	15	5	0	
	Não	90	70	21	6	0	

Fonte: Elaborada pela autora.

Glossário

Luz É a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual. É considerada a porção do espectro eletromagnético visível compreendida no intervalo de comprimento de onda de 380 a 780 nm.

Radiação A radiação é a propagação ou a condução do calor a uma certa velocidade.

Irradiação É a propagação da energia (calor) sem que haja a necessidade de um meio material para que isso aconteça.

Ofuscamento (Glare) Sensação visual que acontece quando o processo de adaptação não ocorre normalmente devido a uma variação muito grande de iluminâncias ou a uma variação associada à velocidade muito alta.

Luminância (L) É a luz emitida por uma superfície em uma determinada direção. É o quantitativo mais importante em projetos de iluminação, pois descreve o que é visualizado. É expressa em candelas por metro quadrado (cd/m^2).

Iluminância (E) É a densidade superficial local do fluxo luminoso incidente em uma superfície. Além de uma noção geral do fluxo incidente, a iluminância não descreve o total que chega de várias direções, apenas o total incidente. No SI, a unidade de medida para iluminância é lumen/m² ou lux (lx).