

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo



Dissertação

**Desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas
envidraçadas, em um edifício comercial, no sul do Brasil**

Roseana Bonotto Ruivo

Pelotas, 2021

Roseana Bonotto Ruivo

**Desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas
envidraçadas, em um edifício comercial, no sul do Brasil**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Prof. Dr^a. Celina Maria Britto Correa

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Pelotas, 2021

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

R934d Ruivo, Roseana Bonotto

Desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, em um edifício comercial, no Sul do Brasil / Roseana Bonotto Ruivo ; Celina Maria Britto Correa, orientadora ; Eduardo Grala da Cunha, coorientador. — Pelotas, 2021.

162 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2021.

1. Iluminação natural. 2. Desempenho lumínico. 3. Desempenho termoenergético. 4. Fachadas envidraçadas. 5. Eficiência energética. I. Correa, Celina Maria Britto, orient. II. Cunha, Eduardo Grala da, coorient. III. Título.

CDD : 729.28

Elaborada por Leda Cristina Peres Lopes CRB: 10/2064

Roseana Bonotto Ruivo

Desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas
envidraçadas, em um edifício comercial, no sul do Brasil

Dissertação aprovada, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo,
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25 de novembro de 2021

Banca examinadora:

Prof. Dra. Celina Maria Britto Correa (Orientadora)
Doutora em Arquitetura pela Universidade Politécnica de Madrid

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha (Coorientador)
Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Ariela da Silva Torres
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Isabel Tourinho Salamoni
Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Fernando Simon Westphal
Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho aos meus pais por todo apoio, incentivo e carinho, para que isso fosse possível. A Celina e ao Eduardo, por todos os ensinamentos.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Rosane e Júlio, pelo exemplo a ser seguido e por acima de tudo acreditarem e incentivarem a realização dos meus sonhos.

Aos meus irmãos, Nathálie e Leonardo, por serem o meu esteio e torcerem sempre pelo meu sucesso.

Agradeço em especial, à minha orientadora, Celina Maria Britto Correa, por me guiar ao longo dessa trajetória com tanto carinho e dedicação. Muito por obrigada pelos ensinamentos, incentivo e por ser uma grande fonte de inspiração.

Ao meu coorientador, Eduardo Grala da Cunha, por me fazer acreditar que eu era capaz e pelo exemplo de dedicação.

Agradeço a Deus pela oportunidade e por ter colocado tantos amigos no meu caminho ao longo da realização deste trabalho - vocês tornaram esta trajetória mais fácil! Em especial, à Ludimila pela amizade, troca de conhecimentos e apoio incondicional para que isso se concretizasse.

Aos colegas do Grupo de Estudos em Simulação de Eficiência Energética em Edificações - GES3E, por prontamente me auxiliarem quando necessário, sobretudo a Thalita e o Rodrigo.

Aos membros da banca examinadora Ariela Torres, Isabel Salamoni e Fernando Westphal, por aceitarem o convite de avaliar este trabalho e por todas as contribuições no aperfeiçoamento deste estudo.

Aos professores do PROGRAU pelos ensinamentos e suporte para que eu chegasse até aqui.

Ao Eng. Luís Carlos Bilharva Martins pela generosidade em me auxiliar com informações sobre o edifício objeto deste estudo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

RUIVO, Roseana Bonotto. **Desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, em um edifício comercial, no sul do Brasil.** Orientadora: Celina Maria Britto Correa. 2021. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

O aproveitamento da luz natural é um forte aliado para a redução do consumo de energia em edifícios de escritórios, na medida em que minimiza os custos com iluminação artificial, além de apresentar benefícios para a saúde e bem-estar dos usuários. Entretanto, se, por um lado, a luz natural é desejável, por outro, pode incrementar ganhos térmicos e favorecer a presença de iluminâncias excessivas nos espaços internos. Dessa forma, esse trabalho teve por objetivo avaliar o equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético, em um modelo de edifício comercial com diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, localizado na Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2), considerando o impacto da luz do dia no conforto visual dos ocupantes e na carga térmica da edificação. O método adotado foi a avaliação por simulação computacional dinâmica realizada por meio dos *softwares Rhinoceros* com *plugin ClimateStudio* para iluminação natural e *EnergyPlus* para as simulações termoenergéticas. A partir da definição de um estudo de caso, foi desenvolvido um Caso Base (CB), que serviu de modelo comparativo para os seguintes Casos de Referência (CR): fachada semi-cortina com dispositivos de sombreamento do tipo persiana e diferentes tipos de vidro, fachada cortina com e sem adição de tela perfurada com percentuais distintos de perfuração, além de diferentes configurações de fachada dupla ventilada. Os resultados apontaram que, dentro do contexto analisado, os casos com fachada dupla em que a camada interna corresponde a uma fachada tradicional (fechamento em alvenaria e vidro encaixilhado nas esquadrias) apresentaram um dos melhores pontos de equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético. Além disso, observou-se que uma fachada cortina com dispositivo de sombreamento fixo com percentual de perfuração igual a 50% é capaz de favorecer o desempenho termoenergético do edifício, além de garantir níveis aceitáveis de iluminação natural com menores problemas de ofuscamento. A escolha adequada do envidraçamento externo da edificação mostrou-se um fator determinante para sua eficiência energética, enquanto a adição de persianas automatizadas promoveu maior qualidade lumínica. Por outro lado, o aumento do Percentual de Abertura de Fachada (PAF) sempre elevou o consumo de energia para resfriamento da edificação e o desconforto visual. Os casos com fachada cortina e fachada dupla em que a camada interna correspondeu a uma fachada semi-cortina ou cortina tradicional, contribuíram para o superaquecimento dos espaços internos. A variação da profundidade da cavidade ventilada influenciou os resultados apenas nos casos com menor PAF da camada interna, em que cavidades menores se mostraram mais eficazes.

Palavras-chave: Iluminação natural. Desempenho lumínico. Desempenho termoenergético. Fachadas envidraçadas. Eficiência energética.

Abstract

RUIVO, Roseana Bonotto. **Daylighting and thermoenergetic performances of different types of glazed façades in a commercial building in South Brazil.** Advisor: Celina Maria Britto Correa. 2021. Dissertation (Master Program in Architecture and Urbanism) – Faculty of Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2021.

The use of daylight is a strong ally to reduce energy consumption in office buildings, as it minimizes the costs of artificial lighting, in addition to providing benefits for the health and well-being of users. However, if, on the one hand, daylight is desirable, on the other hand, it can increase thermal gains and raise the presence of excessive illuminance in internal spaces. Hence, this work aimed to evaluate the balance between the daylighting and thermoenergetic performances in a commercial building model with different types of glazed façades, located in the Brazilian Bioclimatic Zone 2 (BZ2), considering the impact of daylight on both the visual comfort of its occupants and in the thermal load of the building. The method adopted was the evaluation through dynamic computer simulation, performed by using the *Rhinoceros* software with the *ClimateStudio* plugin for daylighting and *EnergyPlus* for thermoenergetic simulations. From the definition of a case study, a Base Case (BC) was developed, which served as a comparison for the following Reference Cases (CR): semi-curtain wall with blind-type shading devices and different types of glass, curtain wall with and without perforated screen shading with different percentages of perforation, in addition to different double skin façades configurations. Results showed that, within the context that was analyzed, the cases of double skin façade in which the inner layer corresponded to a traditional façade (closing in masonry and glass framed in the frames) presented one of the best points of balance between the daylighting and thermoenergetic performances. Besides, it was observed that a fixed-shading curtain wall with a 50% perforation can favor the thermoenergetic performance of the building, in addition to guaranteeing acceptable levels of daylighting with fewer glare problems. Proper choice of the external glazing of the building proved to be a determining factor for its energy efficiency, while the addition of automated blinds promoted greater light quality. On the other hand, the increase in the window-to-wall ratio (WWR) increased energy consumption for cooling the building and visual discomfort every time. The cases with curtain wall and double skin façade in which the inner layer corresponded to a semi-curtain wall or a traditional one contributed to the overheating of the internal spaces. The variation in the depth of the ventilated cavity influenced the results only in cases with lower WWR of the inner layer, in which smaller cavities showed to be more effective.

Keywords: Daylighting. Daylighting performance. Thermoenergetic performance. Glazed façades. Energy efficiency.

Lista de figuras

Figura 1 -	Exemplos de edifícios com fachadas envidraçadas construídos em Pelotas-RS.....	27
Figura 2 -	Desenho esquemático de fachada cortina (à esquerda) e fachada semi-cortina (à direita)	29
Figura 3 -	Desenho esquemático de uma fachada cortina convencional (à esquerda) e uma fachada cortina pele de vidro (à direita)	30
Figura 4 -	Tipos de geometria da cavidade em fachadas duplas ventiladas ...	32
Figura 5 -	Variáveis envolvidas no balanço energético de fachadas duplas ...	33
Figura 6 -	Comportamento do vidro frente à radiação solar	34
Figura 7 -	Exemplos de ofuscamento causados por iluminação artificial e iluminação natural	48
Figura 8 -	Fluxograma com indicação das etapas da pesquisa.....	64
Figura 9 -	Mapa com indicação da Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2)	65
Figura 10 -	Planta de situação (à esquerda) e Imagem do Edifício Estudo de Caso (à direita).....	66
Figura 11 -	Modelo digital do Edifício Estudo de Caso	67
Figura 12 -	Plantas baixas do Edifício Estudo de Caso.....	67
Figura 13 -	Planta baixa (à esquerda) e Corte esquemático Caso Base (à direita).....	69
Figura 14 -	Planta baixa CR-1 (à esquerda), Corte esquemático CR-1 (à direita).....	70
Figura 15 -	Planta baixa CR-2 (à esquerda), Corte esquemático CR-2 (à direita).....	70
Figura 16 -	Planta baixa CR-3A (à esquerda), Corte esquemático CR-3A (à direita).....	71
Figura 17 -	Planta baixa CR-4A (à esquerda), Corte esquemático CR-4A (à direita).....	71
Figura 18 -	Planta baixa CR-5A (à esquerda), Corte esquemático CR-5A (à direita).....	72
Figura 19 -	Planta baixa CR-3B (à esquerda), Corte esquemático CR-3B (à direita).....	73

Figura 20 - Planta baixa CR-4B (à esquerda), Corte esquemático CR-4B (à direita)	74
Figura 21 - Planta baixa CR-5B (à esquerda), Corte esquemático CR-5B (à direita)	74
Figura 22 - Planta baixa CR-6 (à esquerda), Corte esquemático CR-6 (à direita)	75
Figura 23 - Planta baixa CR-8 (à esquerda), Corte esquemático CR-8 (à direita)	75
Figura 24 - Imagem ilustrativa da tela perfurada utilizada	76
Figura 25 - Planta baixa CR-9 (à esquerda), Corte esquemático CR-9 (à direita)	77
Figura 26 - Planta baixa CR-10 (à esquerda), Corte esquemático CR-10 (à direita)	77
Figura 27 - Planta baixa CR-11 (à esquerda), Corte esquemático CR-11 (à direita)	77
Figura 28 - Modelos tridimensionais do Caso Base modelados no <i>software</i> SketchUp Make 17 com plugin Euclid (imagem à esquerda) e SketchUp Pro 21 (imagem à direita)	79
Figura 29 - Planta baixa do pavimento tipo	80
Figura 30 - Fluxograma método simulações computacionais de desempenho lumínico	80
Figura 31 - Identificação das variáveis <i>Daylight Availability</i> e <i>Annual Glare</i> no <i>plugin ClimateStudio</i>	81
Figura 32 - Modelo tridimensional simulado no <i>software</i> Rhinoceros com <i>plugin ClimateStudio</i>	82
Figura 33 - Localização do modelo simulado no campo <i>CS Workflows: Site Analysis</i> do <i>plugin ClimateStudio</i>	82
Figura 34 - Critério de análise simulações computacionais de sDA autônoma (300lux/50%)	84
Figura 35 - Critério de análise para simulações de ASE (1000/250h)	84
Figura 36 - Faixas de iluminâncias avaliadas nas simulações de UDI	85
Figura 37 - Classificação do ofuscamento	85
Figura 38 - Modelo tridimensional CR-3	87
Figura 39 - Modelo tridimensional CR-6	88

Figura 40 -	Modelo tridimensional CR-8	88
Figura 41 -	Modelo tridimensional CR-9	89
Figura 42 -	Modelo tridimensional do Caso Base, modelado no <i>software SketchUp Make 17</i>	90
Figura 43 -	Vistas do quarto pavimento	90
Figura 44 -	Planta baixa do quarto pavimento com indicação das zonas térmicas.....	91
Figura 45 -	Imagens internas do Bloco 2.....	91
Figura 46 -	Planta baixa do pavimento tipo (bloco 2) com indicação das zonas térmicas.....	92
Figura 47 -	Camadas simplificadas das paredes externas utilizadas na simulação (dimensões em cm).....	93
Figura 48 -	Planta de cobertura.....	96
Figura 49 -	Modelo tridimensional CR-1	104
Figura 50 -	Modelo tridimensional CR-2	105
Figura 51 -	Planta baixa do pavimento tipo com indicação das zonas térmicas do CR-3A/4A/5A.....	107
Figura 52 -	Modelos tridimensionais CR-3A, CR-4A e CR-5A.....	107
Figura 53 -	Corte esquemático CR-3A, CR-4A e CR-5A	108
Figura 54 -	Corte esquemático CR-3B, CR-4B e CR-5B	111
Figura 55 -	Modelo tridimensional CR-6	112
Figura 56 -	Modelo tridimensional CR-7 e CR-8.....	112
Figura 57 -	Modelo computacional CR-9	114
Figura 58 -	Corte esquemático da fachada dupla ventilada, CR-9, CR-10 e CR-11	115
Figura 59 -	Critérios de definição para a solução de fachada ideal	116
Figura 60 -	Resumo esquemático dos casos analisados, com diferentes tipologias de fachadas envidraçadas.	117
Figura 61 -	Gráfico de demanda de energia do edifício para climatização artificial.....	119
Figura 62 -	Gráfico de desempenho termoenergético (CB x Fachada dupla ventilada) em kWh/m ² .ano	122
Figura 63 -	Resultados das simulações de sDA, realizadas no <i>software Rhinoceros</i> com <i>plugin ClimateStudio</i>	126

Figura 64 - Resultados das simulações de UDI (300-3000lux), realizadas no software Rhinoceros com <i>plugin ClimateStudio</i>	128
Figura 65 - Resultados das simulações de ASE (1000lux/250h), realizadas no software Rhinoceros com <i>plugin ClimateStudio</i>	131
Figura 66 - Resultados das simulações de DPG, realizadas no software Rhinoceros com <i>plugin ClimateStudio</i>	133
Figura 67 - Gráfico e quadro de desempenho termoenergético x desempenho lumínico.....	135
Figura 68 - Resumo esquemático dos principais parâmetros que influenciam no equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético ...	140

Lista de tabelas

Tabela 1 -	Síntese estado atual da arte sobre desempenho de fachadas envidraçadas.....	45
Tabela 2 -	Síntese estado atual da arte sobre desempenho de fachadas duplas ventiladas naturalmente.....	46
Tabela 3 -	Escalas de UDI	57
Tabela 4 -	Critérios estabelecidos para a métrica de análise <i>Spatial Daylight Autonomy (sDA)</i>	58
Tabela 6 -	Índice de probabilidade de ofuscamento da luz natural	59
Tabela 7 -	Refletância e Transmissividade dos materiais em %	83
Tabela 8 -	Configuração do caso CR-2	87
Tabela 9 -	Configuração dos materiais dos Casos de Referência CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B.....	87
Tabela 10 -	Propriedades ópticas dos materiais CR-7 e CR-8.....	88
Tabela 12 -	Componentes construtivos do Edifício Caso Base.....	92
Tabela 13 -	Composição das paredes externas.....	93
Tabela 14 -	Configuração do objeto <i>Surface Control: Movable Insulation</i>	94
Tabela 15 -	Propriedades ópticas dos vidros utilizados na simulação computacional do Caso Base.....	95
Tabela 16 -	Propriedades térmicas das esquadrias do Caso Base (CB)	95
Tabela 17 -	Propriedades das paredes internas	95
Tabela 18 -	Propriedades térmicas das esquadrias internas	96
Tabela 19 -	Configuração do entrepiso	96
Tabela 20 -	Composições da cobertura	97
Tabela 21 -	Densidade de carga térmica interna.....	98
Tabela 22 -	<i>Airflow Network: Simulation Control</i>	99
Tabela 23 -	<i>Airflow Network: Multizone: Zone</i>	99
Tabela 24 -	<i>Airflow Network: Multizone: Surface</i>	100
Tabela 25 -	<i>Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening</i>	100
Tabela 26 -	<i>HVAC Template: Thermostat</i>	101
Tabela 27 -	<i>HVAC Template: Zone: VRF</i>	101
Tabela 28 -	<i>HVAC Template: System: VRF</i>	101
Tabela 29 -	Capacidade do sistema de climatização artificial em KW	102

Tabela 30 - Eficiência mínima dos condicionadores de ar nível A, segundo a INI-C.....	102
Tabela 31 - Características do sistema de climatização artificial	102
Tabela 32 - <i>Availability Manager: Hybrid Ventilation</i>	103
Tabela 33 - Configuração computacional <i>software EnergyPlus</i>	103
Tabela 34 - Configuração do modo de controle das persianas no <i>EnergyPlus</i> ..	105
Tabela 35 - Propriedades ópticas dos vidros presentes no CR-2	105
Tabela 36 - Propriedades térmicas dos vidros das esquadrias CR-2.....	106
Tabela 37 - Configuração do objeto Surface Control: Movable Insulation.....	106
Tabela 38 - Propriedades ópticas dos vidros	109
Tabela 39 - Composição dos vidros da fachada	109
Tabela 40 - Adições <i>Airflow Network: Multizone: Zone</i>	110
Tabela 41 - Adições <i>Airflow Network: Multizone: Surface</i>	110
Tabela 42 - Adições <i>Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening</i>	110
Tabela 43 - Propriedades térmicas dos vidros das esquadrias do CR-6.....	112
Tabela 44 - Configuração CR-7 e CR-8	113
Tabela 45 - Tabela comparativa entre os Casos de Referência com fachada dupla ventilada.....	114
Tabela 46 - Consumo energético total do Caso Base em kWh/m ² .ano.....	161

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Ar-Condicionado
ASE	<i>Annual Sunlight Exposure</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
CB	Caso Base
CBDM	<i>Climate-Based Daylighting Metrics</i>
COP	Coeficiente de Performance
CFD	Dinâmica Computacional de Fluídos
CT	Capacidade Térmica [kJ/m ² K]
CR	Caso de Referência
CV	Conforto Visual
DA	<i>Daylight Autonomy</i>
DCI	Densidade de Carga Interna
DF	<i>Daylight Factor</i> (Fator de luz diurna)
DL	Desempenho Lumínico
DOE	<i>Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos Estados Unidos)
DPE	Densidade de Potência de Equipamentos
DPG	<i>Daylight Glare Probability</i>
DPI	Densidade de Potência de Iluminação
DSF	<i>Double Skin Façades</i>
DT	Desempenho Termoenergético
EPW	<i>Energyplus Weather Data</i>
FC	Fachada Cortina
FDV	Fachada Dupla Ventilada
FS	Fator Solar [%]
FSC	Fachada Semi-Cortina
FT	Fachada Tradicional
IEA	Agência Internacional de Energia
IESNA	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
INI-C	Instrução Normativa do Inmetro

Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
NBR	Norma Brasileira
PAF	Percentual de Abertura de Fachada
PVB	<i>Polivinil Butiral</i>
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos
sDA	<i>Spatial Daylight Autonomy</i>
SHGC	<i>Solar Heat Gain Coefficient</i> (Coeficiente de Ganho de Calor Solar) [%]
tvis	Transmitância a Luz Visível [%]
TP	Tela Perfurada
U	Transmitância Térmica [W/m ² K]
UDI	<i>Useful Daylight Illuminance</i>
VRF	<i>Variable Refrigerant Flow</i> (Fluxo de Gás Refrigerante Variável)
ZB	Zoneamento Bioclimático Brasileiro
WWR	<i>Window-to-Wall Ratio</i>

Sumário

1 Introdução	19
1.1 Problema de pesquisa	21
1.2 Justificativa do tema	23
1.3 Objetivos	24
1.3.1 Objetivo geral	24
1.3.2 Objetivos específicos	25
1.4 Delimitações da pesquisa	25
2 Revisão de Literatura	26
2.1 Arquitetura contemporânea em edifícios de escritórios	26
2.2 Fachadas na arquitetura contemporânea	28
2.2.1 Vidros	34
2.3 Desempenho de fachadas	36
2.3.1 Síntese do estado atual da arte sobre desempenho de fachadas	45
2.4 Desempenho lumínico	47
2.5 Luz natural e eficiência energética na arquitetura	50
2.6 Desempenho lumínico x desempenho termoenergético	51
2.7 Simulação computacional	54
2.7.1 Métricas de avaliação	56
2.8 Normas técnicas	59
2.9 Considerações finais sobre as referências bibliográficas	61
3 Método	63
3.1 Definição da Zona Bioclimática	65
3.2 Estudo de caso	65
3.3 Definição do Caso Base	68
3.4 Definição dos Casos de Referência	69
3.4.1 Caso de Referência 1 (CR-1)	69
3.4.2 Caso de Referência 2 (CR-2)	70
3.4.3 Casos de Referência CR-3A, CR4A e CR-5A	71
3.4.4 Casos de Referência CR-3B, CR4B e CR-5B	73
3.4.5 Caso de Referência 6 (CR-6)	74
3.4.6 Casos de Referência CR-7 e CR-8	75
3.4.7 Casos de Referência CR-9, CR-10 e CR-11	76

3.5 Simulações computacionais	78
3.6 Simulação computacional de desempenho lumínico	79
3.6.1 Configuração computacional para simulação de iluminação natural do Caso Base.....	81
3.6.1.1 Configuração computacional para Disponibilidade de luz natural (<i>Daylight Availability</i>)	82
3.6.1.2 Definição do plano e pontos de análise de luz natural	82
3.6.1.3 Configuração dos materiais	83
3.6.1.4 Configuração das métricas de análise	83
3.6.2 Configuração computacional para análise de Ofuscamento anual (<i>Annual Glare</i>) do Caso Base.....	85
3.6.3 Configuração computacional de iluminação natural dos Casos de Referência.....	86
3.6.3.1 Caso de Referência CR-1.....	86
3.6.3.2 Caso CR-2	86
3.6.3.3 Casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B	87
3.6.3.4 CR-6.....	88
3.6.3.5 Casos de Referência CR-7 e CR-8.....	88
3.6.3.6 Casos de Referência CR-9, CR-10 e CR-11	89
3.7 Simulação computacional de desempenho termoenergético	89
3.7.1 Modelagem e configuração computacional do Caso Base	89
3.7.2 Configuração do envelope construtivo	92
3.7.2.1 Configuração das paredes externas.....	93
3.7.2.2 Configuração do entrepiso e da cobertura	96
3.7.3 Definição da densidade de carga interna e padrão de uso e ocupação do edifício	97
3.7.3.1 Configuração do sistema de iluminação.....	97
3.7.3.2 Equipamentos e padrão de ocupação	98
3.7.4 Configuração do Sistema de Climatização Artificial	98
3.8 Configuração computacional de desempenho termoenergético dos Casos de Referência.....	103
3.8.1 Caso de Referência CR-1.....	104
3.8.2 Caso de Referência CR-2.....	105
3.8.3 Caso de Referência CR-3A, CR-4A e CR-5A	106

3.8.4 Caso de Referência CR-3B, CR-4B e CR-5B	111
3.8.5 Caso de Referência CR-6.....	111
3.8.6 Caso de Referência CR-7 e CR-8	112
3.8.7 Caso de Referência CR-9, CR-10 e CR-11	113
3.9 Método de análise dos resultados	115
4 Resultados	118
4.1 Avaliações de desempenho termoenergético	118
4.1.1 Desempenho termoenergético dos casos com fachada dupla ventilada	122
4.2 Avaliações de desempenho lumínico.....	125
4.2.1 Autonomia de luz natural espacial (sDA)	125
4.2.2 Iluminância útil da luz natural (UDI).....	127
4.2.3 Exposição a luz solar direta (ASE)	130
4.2.4 Daylight glare probability (DGP)	132
4.3 Desempenho lumínico x termoenergético	135
5 Conclusão	141
5.1 Limitações da pesquisa.....	144
5.2 Sugestões para trabalhos futuros	145
Referências Bibliográficas	146
Apêndice A – Cálculo da cerâmica equivalente	158
Apêndice B – Cálculos para modificar a condutividade térmica da fachada cortina.....	160
Apêndice C.....	161

1 Introdução

O uso da iluminação artificial e do ar-condicionado em ambientes de trabalho ao longo do dia é um dos fatores que mais contribuem com o elevado consumo de energia em edificações não-residenciais. De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA, 2020), os edifícios, juntamente com o setor da construção civil, são responsáveis por quase 36% do consumo final de energia e por quase 40% do total de emissões de CO₂. Ainda segundo a Agência, a demanda energética para a construção de novas edificações segue aumentando, impulsionada pelo melhor acesso à energia nos países em desenvolvimento, maior propriedade e uso de dispositivos que consomem energia e pelo rápido crescimento no setor da construção.

No tocante ao contexto da arquitetura mundial, percebe-se, a partir da Segunda Guerra Mundial, a proliferação da arquitetura do Estilo Internacional. Isso levou à repetição de edifícios caixas de vidro e ao exacerbado consumo de energia nas décadas seguintes, espalhando-se por cidades de todo o mundo devido à crença de que a tecnologia de sistemas prediais seria capaz de controlar totalmente as condições ambientais de qualquer edifício (VEDOVELLO, 2012).

No Brasil essa situação não foi diferente, onde edificações com grandes áreas de vidro nas fachadas tem se consolidado como um estilo da arquitetura contemporânea de escritórios (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014; DE OLIVEIRA; HELENA; MARQUES, 2017). Características como a transparência, a integração visual entre os ambientes interno e externo e a admissão de luz natural são atrativos bastante valorizados pelos projetistas e contribuem para a disseminação de fachadas envidraçadas no país.

Por outro lado, ao mesmo tempo em que a integração visual com o ambiente externo é altamente desejável pelos usuários, o uso de grandes panos de vidro pode acarretar um aumento significativo da carga térmica interna da edificação, causando desconforto, maiores gastos com condicionamento de ar e, conseqüentemente, aumento no consumo energético. Isto ocorre pois, além de permitirem maior ganho de calor nos ambientes, também o perdem excessivamente. (HUANG; NIU; CHUNG, 2014)

O uso de tipologias construtivas inadequadas ao clima brasileiro pode propiciar a maior necessidade de climatização artificial para resfriamento do edifício, devido à

falta de controle da eficiência da envoltória, sendo responsável por um grande dispêndio energético nas construções (PESSOA; GHISI; LAMBERTS, 2013). Dessa forma, propostas de *retrofit* e a construção de novos edifícios representam oportunidades para projetar, construir e operar edificações de alto desempenho, de modo a reduzir o consumo de energia e a fornecer qualidade ambiental interna (BUSTAMANTE *et al.*, 2017).

É importante salientar que a luz do dia sempre desempenhou papel crucial nessa redução do consumo energético, além de apresentar outras vantagens, como: a preferência por vistas e pela luz natural ao invés da iluminação artificial; o impacto positivo na produtividade e desempenho das pessoas; além de seu forte impacto nos ritmos circadianos (BARBOSA, 2010; KLEINDIENST; ANDERSEN, 2012; FERNANDES, 2016; VEITCH; CHRISTOFFERSEN; GALASIU, 2013a, 2013b),

Para além do conforto e estado de bem-estar que a iluminação natural proporciona, também se revela como uma importante estratégia na busca por uma maior eficiência energética nas edificações. Seu uso adequado em conjunto com um sistema de controle da iluminação artificial pode contribuir significativamente para a economia de energia, principalmente em edifícios comerciais, industriais e públicos (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; MOURA; CORREA; CUNHA, 2020).

O desempenho térmico e o uso da luz natural em edificações estão relacionados às variáveis arquitetônicas, mais especificamente àquelas determinantes da envolvente construída (forma, orientação solar, dispositivos de sombreamento, materiais construtivos e de acabamento). A envolvente deve, por sua vez, responder de forma satisfatória ao contexto em que se insere, levando-se em consideração não somente os fatores climáticos, mas também questões relacionadas aos meios cultural e socioeconômico locais, que também acabam por definir possibilidades tecnológicas de materiais e técnicas necessárias à sua execução.

Todavia, apesar de muitos pesquisadores divulgarem e incentivarem o aproveitamento da iluminação natural como uma estratégia para reduzir o consumo energético em edificações, desde que a presença de grandes panos de vidro tem se apresentado como solução recorrente, faz-se importante ampliar os conhecimentos sobre os ganhos e perdas térmicas proporcionados por esses sistemas.

Em um país continental como o Brasil, com climas muito distintos – alguns mais frios e outros mais quentes – soluções que parecem adequadas a um contexto não o são a outro. O mesmo pode acontecer dentro de um mesmo cenário climático, onde

tipologias construtivas distintas podem apresentar resultados de desempenhos diferentes. Dessa forma, a análise dos desempenhos lumínico e termoenergético em fachadas de edificações é de fundamental importância, uma vez que a relação entre o acesso à iluminação natural e à sua influência no desempenho térmico do edifício pode comprometer não só o consumo de energia da edificação, mas também, e não menos importante, aspectos relacionados ao conforto dos usuários.

Sendo assim, esta pesquisa foi desenvolvida por meio do estudo de caso de um edifício de escritórios de planta livre, localizado na Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2), onde fica localizada Pelotas, cidade do extremo sul do Brasil. O estudo de caso foi tomado como Caso Base (CB), cujo desempenho lumínico e termoenergético foi comparado com casos de referência, que apresentam diferentes tipologias de fachadas envidraçadas: fachada semi-cortina com distintos tipos de vidro, com e sem dispositivo de sombreamento do tipo persiana; fachada cortina; fachada cortina com dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada com percentuais diferentes de abertura; e diferentes configurações de fachada dupla ventilada.

Pela simulação computacional dinâmica, buscou-se avaliar qual ou quais tipologias de fachadas envidraçadas apresentam o maior equilíbrio em termos de iluminação natural de qualidade combinada ao menor consumo energético para climatização artificial do edifício, reconhecendo-se, por um lado, a importância da luz natural na saúde e bem-estar dos usuários e, pelo outro, a necessidade de menor impacto ambiental como consequência da racionalização de energia.

Assim, esta pesquisa procurou, a partir dos desempenhos verificados, contribuir com informações que precisam ser conhecidas e fomentadas para potencializar um melhor uso da luz natural. Pretendeu-se destacar a relevância desse estudo para a área de conhecimento da arquitetura, mais diretamente para a investigação do conforto e sustentabilidade do ambiente construído, colaborando, deste modo, com a qualidade de vida do usuário por meio de melhores condições ambientais.

1.1 Problema de pesquisa

Edificações altamente envidraçadas favorecem o acesso à iluminação natural através de seus fechamentos transparentes, contribuindo, assim, para a redução do consumo de energia com iluminação artificial no interior do edifício. Em contrapartida, grandes áreas de vidro também podem permitir perdas ou ganhos excessivos de calor,

que influenciam diretamente no consumo energético para aquecimento ou resfriamento da edificação.

Diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, como a semi-cortina, cortina e fachada dupla ventilada, podem favorecer a incidência solar de forma adequada ou promover o aumento da carga térmica da edificação, dependendo da sua configuração. Parâmetros como o Percentual de Abertura da Fachada (PAF), as características do envidraçamento externo e a presença ou não de dispositivos de sombreamento, têm impacto direto no acesso e na qualidade da iluminação natural, assim como no consumo para climatização artificial.

Selecionar o tipo de envidraçamento da edificação pode ser uma tarefa complicada quando iluminação natural e economia de energia precisam ser consideradas simultaneamente (HEE *et al.*, 2015).

Sabe-se que quanto maior a transmitância a luz visível (tvis) de um vidro, maior os níveis de iluminação no ambiente interno, no entanto, de acordo com Liu *et al.* (2021) a medida que a tvis aumenta, maior é a possibilidade de ocorrência de ofuscamento. Esta situação deve ser vista com cautela, pois em condições de ofuscamento, os usuários tendem a fazer uso de dispositivos de sombreamento, como persianas, e a acionar a iluminação artificial, aumentando consequentemente o consumo de energia para iluminação no edifício. Além disso, as propriedades térmicas dos vidros têm impacto direto no desempenho térmico da edificação.

Uma das maneiras mais eficazes de se proteger uma edificação da radiação solar direta, evitando-se o ganho térmico, ocorre por meio do sombreamento parcial de suas aberturas. Do ponto de vista térmico, os elementos de sombreamento reduzem substancialmente os ganhos de calor pela insolação direta e difusa, diminuindo, consequentemente, a carga térmica total dos ambientes. Esta redução vai gerar, por sua vez, menores temperaturas internas do ar e melhores condições de conforto (PEREIRA, 2017).

Além da redução na carga térmica da edificação, o uso adequado de dispositivos de sombreamento pode melhorar a qualidade da luz natural e impedir a incidência solar direta, diminuindo os efeitos de ofuscamento e brilho. Por outro lado, o seu acionamento indevido pode reduzir a disponibilidade de iluminação natural no edifício, gerando a maior necessidade do uso do sistema de iluminação artificial (ROCHA; PEREIRA, 2011).

A relação entre desempenho lumínico e termoenergético é uma tarefa complexa, pois à medida que sombreamos o ambiente, evitamos a incidência direta do sol e o aquecimento do mesmo, enquanto contribuímos também para a redução da iluminância interna no ambiente.

Nesse sentido, o problema de pesquisa sobre o qual este trabalho se debruçou foi o de verificação do equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, considerando o impacto da luz natural na carga térmica da edificação e no conforto visual dos usuários. O saldo entre contribuir com iluminação natural, controlando os ganhos solares adequadamente é um dos principais problemas a serem solucionados.

Partiu-se da hipótese de que uma edificação, ao contemplar autonomia de luz natural, apresenta um aumento na sua carga térmica, assim como pode favorecer a ocorrência de iluminâncias excessivas. Dessa forma, determinadas estratégias de projeto, como a escolha adequada do tipo de vidro, o uso de proteção solar nos fechamentos transparentes e a configuração da fachada, podem contribuir para a redução dessa carga, ao mesmo tempo em que podem limitar o acesso à luz natural, não garantindo os níveis mínimos de iluminância e qualidade de iluminação recomendados pelas normativas brasileiras.

1.2 Justificativa do tema

O ingresso da luz natural em edificações de escritórios traz benefícios que vão além das questões energéticas, sendo que estudos já demonstraram sua importância para tornar os ambientes mais saudáveis e produtivos (SIGNORINI, 2015). Além disso, diversos trabalhos já comprovaram que a integração entre a luz natural e a artificial, assim como a utilização de sistemas de controle de iluminação, são fatores chaves para o conforto térmico e visual dos usuários, bem como para a minimização do consumo energético.

Em estudo realizado, Didoné (2009) comprovou que é possível reduzir a demanda de iluminação artificial em até 62% quando a luz natural é considerada. Da mesma forma, Xu *et al.* (2016) conseguiram reduzir o consumo energético em até 50% pela combinação entre sistemas de controle da luz artificial vinculados à disponibilidade da luz natural em um edifício de escritórios.

Em edificações comerciais, o uso da planta livre e de fachadas envidraçadas fomentou o desenvolvimento de edifícios com maior permeabilidade a luz natural.

Embora tenha trazido benefícios, essa tipologia construtiva também trouxe consequências negativas para o desempenho térmico dos edifícios nos casos em que há ausência de proteções solares externas adequadas, contribuindo para a formação do efeito estufa dentro dos ambientes (FONSECA *et al.*, 2009).

A luz natural nos espaços internos vem sendo tratada pelos arquitetos de forma controversa. Se por um lado ela é um recurso bem-vindo, que pode ser usado para atender às deficiências térmicas e visuais em um dado ambiente, por outro, pode ser considerado um fator inconveniente, que aquece os espaços e, como consequência, aumenta a dependência de energia elétrica devido ao consumo elevado de ar condicionado (DÍAZ, 2011).

Para Cammarano *et al.* (2015), a maior introdução da luz natural nas edificações promoveu uma maior necessidade de informações sobre o impacto de diferentes tipologias arquitetônicas nos desempenhos lumínico e termoenergético das edificações.

Assim, diante dos aspectos abordados, que observam a importância da luz natural como forma de contribuir com o menor uso de iluminação artificial e consequente racionalização do consumo energético, combinado a seus benefícios no conforto e na qualidade de vida dos usuários, corrobora a necessidade de se fazer uso dessa estratégia passiva – uso da luz natural – para fomentar o desempenho dos edifícios comerciais.

Portanto, esta pesquisa visou, a partir da verificação de desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, contribuir com informações que permitissem a integração entre essas duas variáveis, buscando o aumento da eficiência energética pelo aproveitamento da luz natural. Também teve como desafio fornecer suporte a arquitetos e projetistas na busca por melhores soluções de projetos que possam garantir, de forma equilibrada, o aproveitamento adequado da luz natural, fonte abundante e gratuita.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Esta pesquisa apresentou como objetivo geral avaliar o ponto de equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas aplicadas em um modelo de edifício comercial, no sul do Brasil.

1.3.2 Objetivos específicos

Foram objetivos específicos deste trabalho:

- a) avaliar o desempenho termoenergético do edifício, considerando diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, por meio de simulação computacional dinâmica;
- b) avaliar a disponibilidade de luz natural e a probabilidade de ofuscamento em diferentes soluções de fachadas envidraçadas, por meio de simulação computacional dinâmica;
- c) analisar de forma integrada os resultados de desempenho lumínico e termoenergético na busca pela(s) tipologia(s) de fachada(s) envidraçada(s) que apresenta(m) o maior equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético, ou seja, acesso à iluminação natural de qualidade combinado ao baixo consumo de energia para climatização artificial.

1.4 Delimitações da pesquisa

Esta pesquisa apresentou os seguintes contornos:

- a) as avaliações de iluminação natural foram abordadas de forma qualitativa através das variáveis: Autonomia de luz natural espacial (*Spatial Daylight Autonomy* – sDA); Iluminância útil da luz natural (*Useful Daylight Illuminance* - UDI); Exposição a luz solar direta anual (*Annual Sunlight Exposure* – ASE); e Probabilidade de Ofuscamento (*Daylight Glare Probability* – DGP);
- b) com o intuito de tornar as análises de desempenho lumínico e termoenergético mais abrangentes, as obstruções do entorno foram desconsideradas durante as simulações computacionais;
- c) as análises de desempenho termoenergético consideraram apenas o consumo energético para climatização artificial do edifício. O consumo para iluminação artificial foi desprezado durante a análise de resultados devido a inconsistências apresentadas pelo software *EnergyPlus*.

2 Revisão de Literatura

No tocante à base teórica utilizada para o aprofundamento do tema proposto, buscou-se subsídios na bibliografia técnica sobre fachadas envidraçadas em edifícios comerciais, desempenho de fachadas, desempenho lumínico, iluminação natural integrada a eficiência energética, além de desempenho termoenergético e conforto visual. Acerca dessas literaturas, apresenta-se a seguir uma síntese sobre alguns dos princípios básicos relacionados ao tema e ao estado atual da arte.

2.1 Arquitetura contemporânea em edifícios de escritórios

De acordo com Abascal (2005), a partir do ano 1980, os avanços tecnológicos fomentaram o que se chamou de globalização, inter-relacionando o mundo tecnológico, financeiro, comercial e sociocultural. Dessa forma, produto da sociedade global, a arquitetura contemporânea, assim designada a partir de meados da década de 80, marcou o retorno das preocupações com o bem-estar do usuário, o sentimento de pertencimento do espaço, a qualidade de vida e o meio ambiente.

No que diz respeito ao contexto internacional da arquitetura, Marcondes (2010), analisou edificações construídas no mundo a partir do final da década de 1990. Identificou que as construções se desenvolveram de forma distinta nos países europeus, nos Estados Unidos, no Japão e na Austrália, apresentando em comum um olhar voltado para a sustentabilidade e a eficiência energética.

Ainda, de acordo com a autora, nas edificações norte-americanas, percebeu-se a busca pela eficiência energética por meio do uso de tecnologias eficientes, seja no emprego de vidros especiais ou na geração de energia limpa, sendo característico o uso de torres de vidro seladas, planta profunda com núcleo central e uso intenso de climatização artificial. Já nos países da União Europeia, as construções passaram a adotar estratégias passivas para a eficiência energética e o conforto ambiental dos usuários, por meio do uso de normas e regulamentações de desempenho. Na Alemanha, por exemplo, tornou-se comum o uso de plantas estreitas, com distâncias reduzidas até a fachada para aproveitamento da luz natural, com destaque para as fachadas duplas ventiladas, estratégia está de projeto que passou a ser adotada em todo mundo (MARCONDES, 2010).

A partir da década de 1980, os edifícios comerciais no Brasil passaram a adotar

tipologias construtivas importadas do exterior, principalmente, o modelo caixa de vidro, com planta profunda, uso intensivo de ar-condicionado e persianas internas para minimização dos efeitos negativos da iluminação natural. A mesma situação persistiu na década seguinte.

Já a partir de 2005, com o crescimento econômico do país, iniciou-se uma demanda maior por edifícios comerciais de alto padrão, fachadas com estrutura metálica e/ou acabamento em vidro, planta livre e alta flexibilidade, além de climatização artificial. Preocupações com a sustentabilidade passaram a ganhar cada vez mais importância e a busca por edifícios com selos de certificações ambientais acelerou, demonstrando a importância da eficiência energética nos projetos de arquitetura (MARCONDES, 2010).

A arquitetura contemporânea, principalmente aquela realizada nos Estados Unidos, também teve repercussão na arquitetura do estado do Rio Grande do Sul. Edifícios empregando grandes panos de vidro como vedação sustentados por perfis verticais de alumínio e, posteriormente, fachadas totalmente envidraçadas, representam essa influência (LUCCAS, 2000).

A arquitetura da cidade de Pelotas-RS apresenta exemplares com tais características, entre eles edifícios fruto da produção arquitetônica corporativa mais recente na cidade, como o *Moinho Office*, o *Euro Smart Office* e os edifícios sede do Hospital Unimed Pelotas, bem como dos Bancos Unicred e Sicredi (Figura 1).

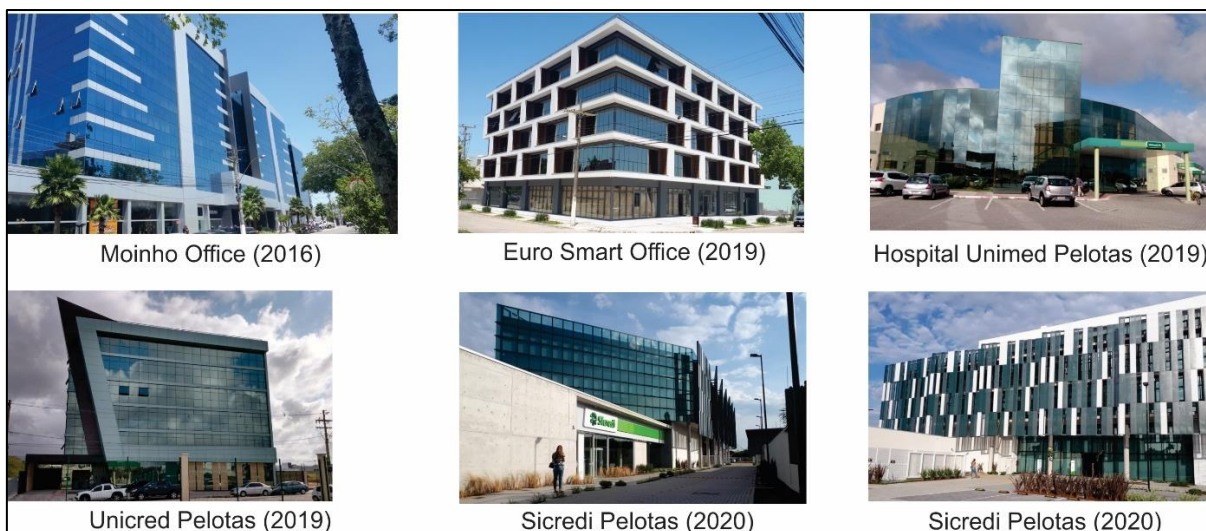


Figura 1 - Exemplos de edifícios com fachadas envidraçadas construídos em Pelotas-RS
Fonte: AUTORA, 2020

2.2 Fachadas na arquitetura contemporânea

A vedação vertical externa, também denominada de fachada, pode ser compreendida como sendo um subsistema do edifício constituído por elementos que definem os ambientes internos dos externos, controlando a ação de agentes indesejáveis, sendo, portanto, o invólucro do edifício. Esse subsistema, que inclui as esquadrias e os revestimentos, tem como principal função a criação de condições de habitabilidade para o edifício, além da função estética (DE OLIVEIRA, 2009).

As fachadas também definem a imagem, os conceitos arquitetônicos utilizados e os padrões construtivos dos edifícios. A contemporaneidade introduziu novas maneiras de se pensar esse elemento construtivo por meio da busca pela sustentabilidade, pela integração entre os ambientes externo e interno, além da procura por métodos construtivos e tecnológicos que proporcionassem sistemas mais eficientes.

A fachada reflete as tendências na arquitetura e é produto da globalização. Dessa maneira, fachadas com grandes áreas envidraçadas vêm se consolidando como um estilo internacional da arquitetura contemporânea corporativa (DE OLIVEIRA; MARQUES, 2017; PINTO, 2017; FELIPPE, 2016; ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014; FREEWAN, 2014; ATZERI; CAPPELLETTI; GASPARELLA, 2014), tendência esta que vem se fortalecendo no Brasil nos últimos anos.

A disseminação do uso da torre de vidro e de plantas mais profundas criou a necessidade de uso de sistemas ativos para climatização artificial, fomentando com isso o aumento do consumo energético (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014; BRUGNERA, 2018; DE OLIVEIRA; MARQUES, 2017). Reitera-se, então, a necessidade de estudos relacionados a análises das fachadas envidraçadas, objetivando potencializar seus benefícios e minimizar seus impactos na habitabilidade dos espaços internos.

Para os projetistas, é fundamental a avaliação desse elemento construtivo como um todo, observando questões como a implantação, o sombreamento do entorno e os detalhes do projeto, com o intuito de propor soluções diferenciadas para cada tipologia. Além disso, é necessário encarar a incidência da radiação solar nos vidros como um problema para que se obtenha um equilíbrio entre o desejado ingresso da iluminação natural e a barreira ao calor excessivo (CARAM *et al.*, 2007).

Segundo Brugnera *et al.* (2019), em edifícios corporativos, as fachadas cortina têm substituído as tradicionais. Essa tipologia de fachada surgiu com o

desenvolvimento tecnológico do vidro, primeiramente em painéis de vidros montados em esquadrias leves e, posteriormente, presos diretamente no esqueleto estrutural das edificações (DE OLIVEIRA, 2009). Assim, pode-se dizer que a fachada cortina é um elemento construtivo de vedação independente da estrutura do edifício, formando um fechamento exterior que protege a edificação das diversas exigências ambientais.

O termo fachada-cortina é definido pela NBR 15215-1 (ABNT, 2005) como “[...] envolvente transparente ou translúcida contínua, sem função estrutural, que separa interior e o exterior de uma edificação, permitindo a penetração lateral de luz natural ou radiação solar”.

As fachadas revestidas por vidro podem ser consideradas cortina ou semi-cortina. A primeira é constituída por materiais de camada leve fixados externamente à edificação, enquanto a segunda apresenta uma camada interna que pode ou não ser leve, normalmente um peitoril de alvenaria ou concreto, somado a um revestimento externo envidraçado. A Figura 2 exemplifica estas configurações.

Segundo Vieira (2015), as fachadas revestidas por vidro proporcionam um considerável ganho de iluminação natural, ao mesmo tempo em que podem ser pouco eficientes termicamente, pois o principal elemento que as constitui, o vidro, apresenta elevada transmitância térmica, permitindo a troca rápida de calor entre os ambientes externo e interno da edificação.

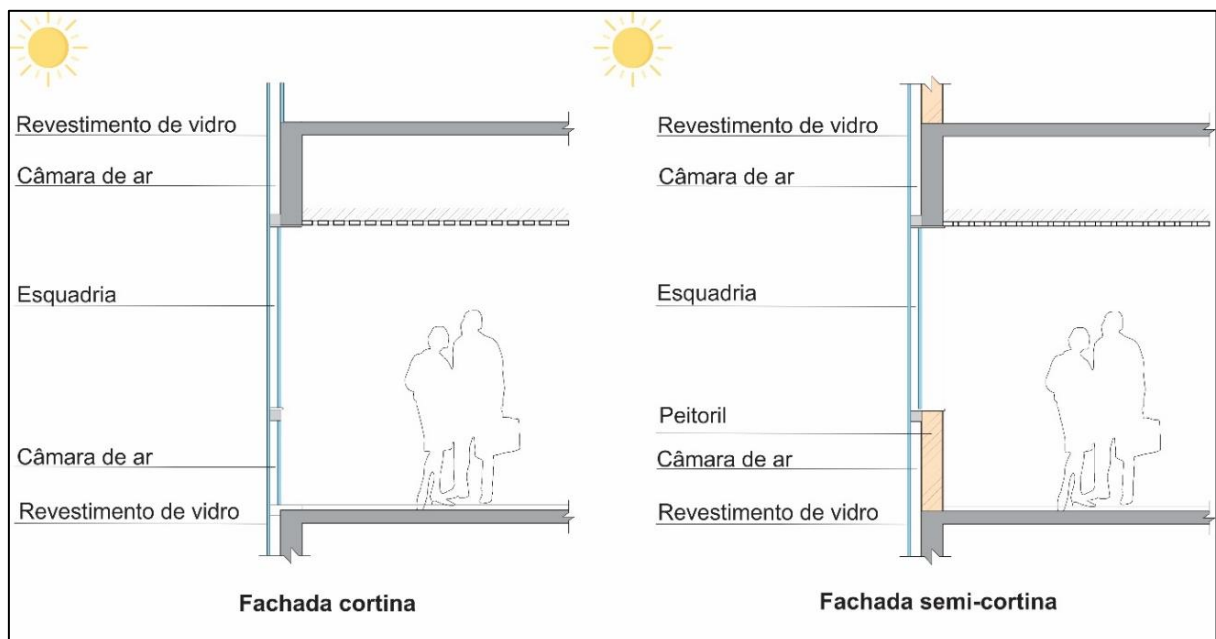


Figura 2 - Desenho esquemático de fachada cortina (à esquerda) e fachada semi-cortina (à direita)
Fonte: AUTORA, 2020

Para De Oliveira (2009), a fachada cortina é constituída de uma ou mais camadas, sendo posicionada de forma totalmente externa à estrutura do edifício, ou seja, à face exterior da viga de borda, formando uma pele sobre o edifício. De acordo com Vedovello (2012), esta tipologia de fachada pode se apresentar das seguintes maneiras:

a) fachada cortina convencional: neste sistema o vidro é encaixilhado e fixado mecanicamente através de perfis de alumínio e guarnições, enquanto a coluna de sustentação dos vidros fica do lado externo da edificação (Figura 3 - A);

b) fachada cortina pele de vidro: nesta configuração o vidro permanece encaixilhado e fixado por meio de perfis de alumínio e guarnições, já as colunas de sustentação dos vidros são fixadas nas vigas. Assim, neste caso, o vidro fica em destaque, apesar da marcação dos caixilhos na fachada (Figura 3 - B);

c) fachada cortina *Structural Glazing*: nesse tipo de fachada, o vidro é colado externamente nos perfis de alumínio, ficando a estrutura oculta na face interna. Dessa forma, este sistema torna a fachada esteticamente mais leve e limpa, pois esconde as estruturas externas de alumínio (Figura 3 - C).

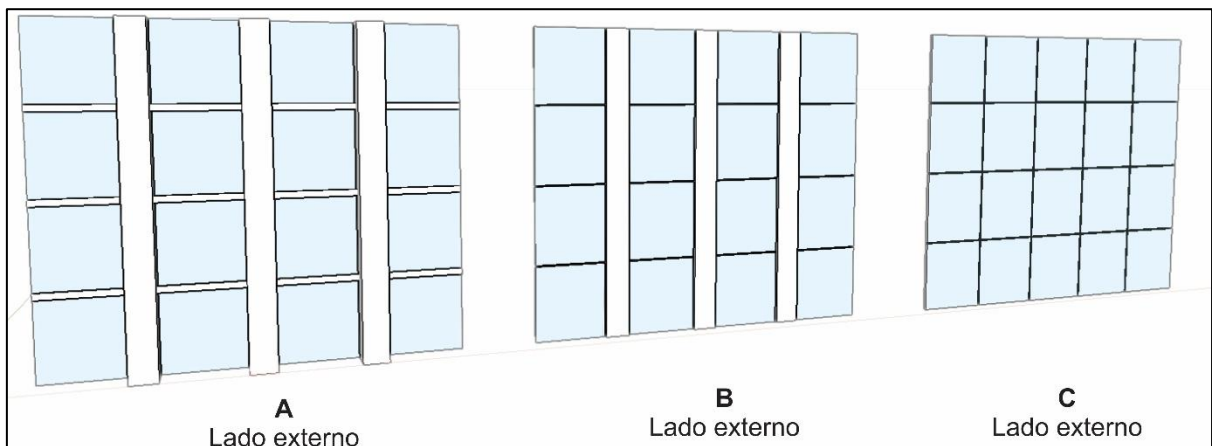


Figura 3 - Desenho esquemático de uma fachada cortina convencional (à esquerda) e uma fachada cortina pele de vidro (à direita)

Fonte: CBIC, 2017, p. 111

As fachadas cortina com múltiplas camadas podem ser organizadas de modo que exista uma câmara de ar, que pode ou não ser estanque. Neste caso, elas são consideradas fachadas duplas ou *double skin façades* (DSF), e quando o ar do espaço interno pode circular para o ambiente externo, são consideradas fachadas duplas ventiladas (LIU, 2010). Na literatura, alguns termos são utilizados para designar

fachadas de pele dupla, como envelope de pele múltipla, pele dupla, fachada de cortes múltiplos e fachada ventilada (ALIBABA; OZDENIZ, 2016).

Dentre as fachadas altamente envidraçadas, as fachadas de pele dupla vêm se destacando mundialmente em edifícios comerciais pela transparência, a integração entre os ambientes interno e externo e a estética contemporânea, combinada ao melhor desempenho termoenergético quando comparado às fachadas cortina de vidro tradicionais (BARBOSA; IP, 2014; LARSEN; RENGIFO; FILIPPÍN, 2015; MELA, 2017). No entanto, sua implementação é desafiadora, pois ainda é escasso o conhecimento acerca dos processos físicos envolvidos em seu comportamento, bem como sobre sua adaptabilidade aos diferentes contextos climáticos (BARBOSA; IP, 2014).

De acordo com Mela (2017), a aplicação de fachadas duplas em países de clima tropical é recente, sendo raros os estudos que se concentram nessas regiões. Ainda segundo a autora, essa tipologia construtiva vem ganhando espaço no Brasil, o que demonstra a importância da ampliação do conhecimento sobre essa solução construtiva.

As fachadas duplas consistem basicamente em uma construção com uma fachada normal (camada interna) e outra fachada adicional externa, usualmente construída em vidro, mas que também pode ser de outro material mais opaco (DE SOUZA, 2017; BARBOSA, 2014). Essa tipologia de fachada pode apresentar diferentes configurações tanto na camada externa, com diferentes possibilidades de geometria da cavidade ventilada, envidraçamento e área de abertura, quanto na camada interna, que pode ser constituída por uma fachada tradicional (vidro encaixilhado apenas nas esquadrias) ou ser composta por uma fachada cortina ou semi-cortina.

Devido às diferentes possibilidades de configuração, a maioria dos estudos com fachada dupla tem como foco principal a avaliação do impacto da camada externa no desempenho termoenergético da edificação, sendo poucos os trabalhos que se dedicam à avaliação da influência da camada interna, que também pode ser decisiva para a melhora da eficiência energética nessa tipologia construtiva (KHALIFA *et al.*, 2017).

Entre as vantagens desta tipologia construtiva estão o isolamento térmico e acústico, a redução dos efeitos da pressão do vento e a possibilidade de reabilitação de fachadas de pele única pelo acréscimo de uma segunda camada de revestimento

externo. Já entre as suas desvantagens estão o alto custo, a falta de informações em relação à proteção contra incêndios, a redução do espaço interno disponível e a maior transmissão sonora de sala a sala ou de piso a piso (ALIBABA; OZDENIZ, 2016).

Os principais componentes das fachadas duplas são os vidros e a câmara de ar, podendo esta ser classificada de acordo com o tipo de ventilação (natural, mecânica ou híbrida), o caminho do ar no interior da cavidade (cortina de ar exterior, cortina de ar interior, suprimento de ar, exaustão de ar e zona de transição) e a geometria da cavidade (*box-window*, *corredor*, *shaft-box* e *multipavimentos*) (ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA, 2017). A Figura 4 representa de forma esquemática os diferentes tipos de geometria da cavidade em fachadas duplas.

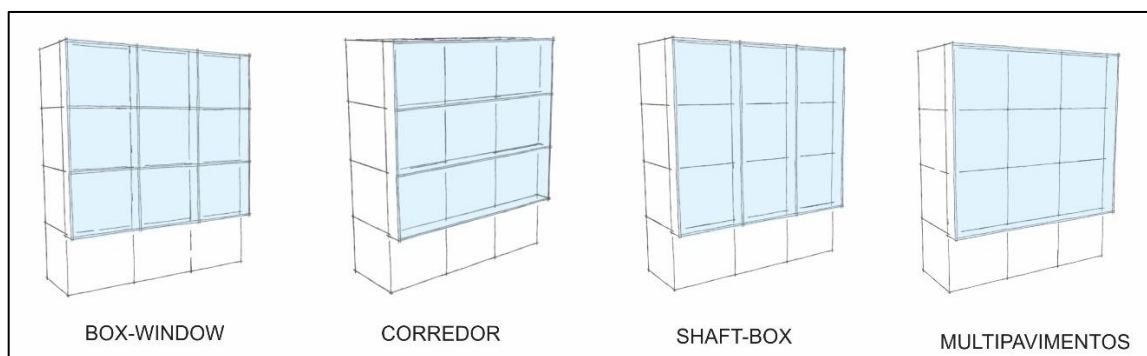


Figura 4 - Tipos de geometria da cavidade em fachadas duplas ventiladas
Fonte: Adaptada de ALBERTO, RAMOS E ALMEIDA, 2017

De acordo com Alberto, Ramos e Almeida (2017), a geometria da cavidade tem interferência direta na quantidade de radiação solar que é transmitida para o espaço interno, assim como na condução do fluxo de ar do interior da cavidade. Segundo os autores mencionados, quanto maior o número de divisões na cavidade, maior a quantidade de obstáculos para a radiação solar e, conseqüentemente, pior o desempenho termoenergético do edifício.

A câmara de ar da fachada pode apresentar dimensões que variam de 0,2m a mais de 2m. A variação da profundidade da cavidade interfere na velocidade do ar dentro dela, além de modificar os coeficientes de transferência de calor por convecção no seu interior, alterando a temperatura do ar e as trocas térmicas com o ambiente interno (ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA, 2017).

Quando essa câmara é projetada para ventilação natural, ocorre o chamado efeito chaminé. Esse efeito se deve à diferença de densidade entre o ar mais quente, de dentro da cavidade, e o ar frio, de fora. Assim, o ar no interior da cavidade é aquecido pela radiação solar e quando entra em contato com o ar externo, mais frio,

é exaurido para fora por meio das aberturas superiores. Em edifícios com ventilação natural, o ar fresco é frequentemente conduzido das janelas do lado oposto da fachada dupla, que passa pelo espaço interno do edifício antes de ser extraído na cavidade da pele dupla (RADHI; SHARPLES; FIKIRY, 2013). A Figura 5 apresenta as principais variáveis envolvidas no balanço energético de uma fachada dupla.

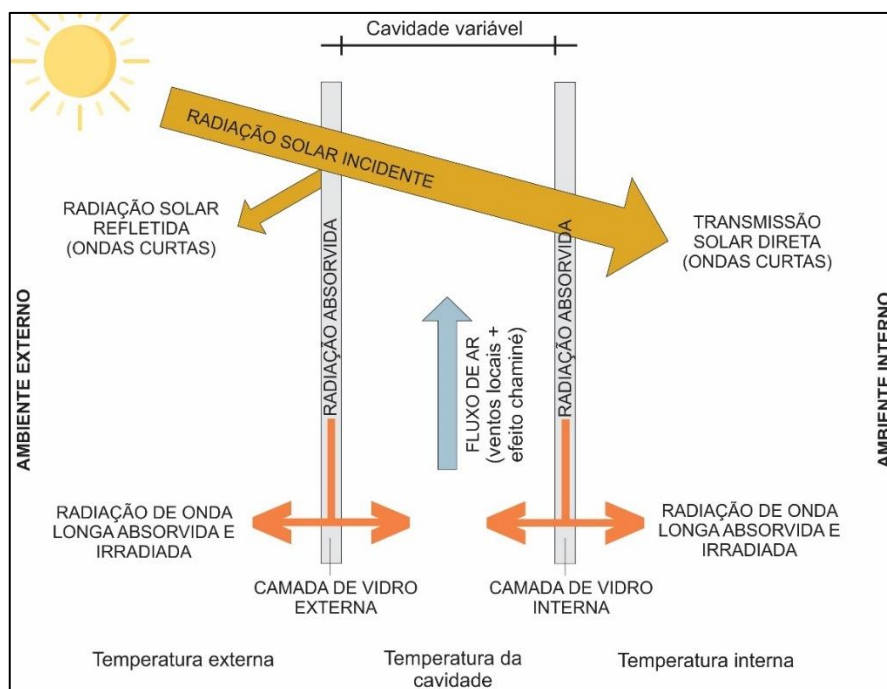


Figura 5 - Variáveis envolvidas no balanço energético de fachadas duplas
Fonte: Adaptada de MAZZAROTTO, 2011

Quando projetada adequadamente, a cavidade ventilada tem a capacidade de reduzir significativamente o consumo de energia do edifício. No entanto, uma cavidade mal projetada pode resultar em temperaturas internas desconfortáveis e em consumo de energia adicional (RUNDLE *et al.*, 2011). Dentro da cavidade, também é possível instalar dispositivos de sombreamento, o que permite regular a incidência solar que atinge a camada interna e melhorar o fluxo de ar através do edifício, contribuindo para a manutenção da temperatura interna e melhorando o conforto dos usuários em climas mais quentes (PAPPAS; ZHAI, 2008).

A aplicação de fachadas duplas pode ser uma solução eficaz visando a eficiência energética quando se projeta edifícios com fachadas transparentes (BARBOSA; IP, 2014; SU; LI; XUE, 2017; WEN *et al.*, 2017). Ela minimiza o fluxo de calor do ambiente interno da edificação para o ambiente externo e vice e versa, permitindo manter a temperatura interna da edificação por um tempo maior e reduzindo, por consequência, a utilização de climatização artificial (DE SOUZA, 2017).

Sendo assim, no período de verão, o ar quente do espaço intermediário é removido com o fluxo de ar, promovendo uma redução da carga de refrigeração do edifício, enquanto no inverno, as aberturas são fechadas a fim de proteger o escape de ar quente oriundo do espaço ocupado pelas pessoas (DING; HASEMI; YAMADA, 2005).

2.2.1 Vidros

Os sistemas de envidraçamento afetam a estética da edificação, fornecem ventilação, iluminação natural, integração visual entre os ambientes interno e externo, e atuam diretamente no conforto humano e no consumo energético. As características específicas dos materiais podem contribuir ou prejudicar a iluminação natural, sendo que os vidros, por exemplo, podem distorcer a passagem de luz, atuando, muitas vezes, como elementos de controle ou maximizadores do ganho solar em função da transmissão luminosa e do fator solar (FERNANDES, 2016).

Para o bom desempenho de fachadas envidraçadas é preciso estar atento aos coeficientes globais de transmissão de calor dos vidros, transmitância à radiação solar e transmitância luminosa, fator solar, transmissão sonora, além de questões relacionadas à resistência ao fogo.

Em um fechamento transparente, a radiação solar incidente pode ser absorvida, refletida ou transmitida para o interior da edificação (Figura 6); essa situação depende diretamente dos índices de absorvidade, refletividade e transmissividade do vidro. A parcela absorvida converte-se em calor e pode ser reemitida para o interior ou para o exterior na forma de radiação de onda longa (VEDOVELLO, 2012).

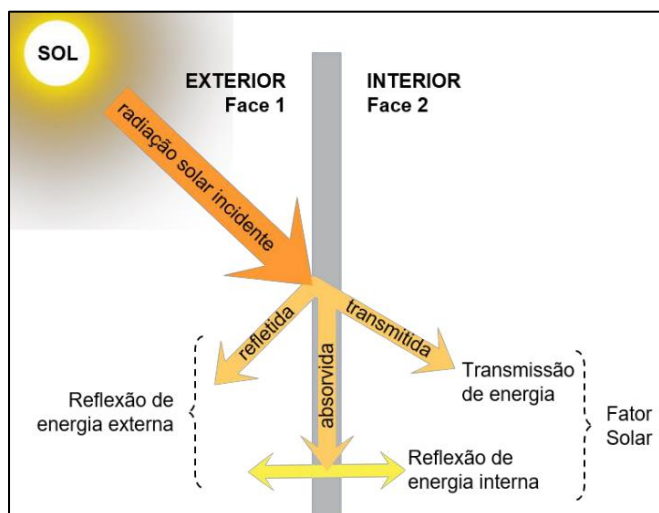


Figura 6 - Comportamento do vidro frente à radiação solar
Fonte: PINTO, 2017, p. 39

De acordo com a NBR 7199 (ABNT, 2016), que trata do uso de vidros na construção civil, os que podem ser utilizados em fachadas são: laminado, aramado e insulado, sendo que este último deve ser composto exclusivamente por vidros permitidos.

De acordo com Andreis (2014), os vidros podem ser:

a) vidro laminado: formado por duas ou mais lâminas de vidro unidas por uma ou mais camadas de polivinil butiral (PVB). É considerado um vidro de segurança, pois quando quebrado, seus fragmentos ficam aderidos a uma película de plástico existente. Esses vidros também podem ser de controle solar, ocasião em que é aplicada uma camada metálica de alta durabilidade e resistência, esta responsável por minimizar os ganhos de calor através do vidro, reduzindo, assim, a carga térmica interna e a necessidade de resfriamento;

b) vidros baixo-emissivos (*Low-e*): os vidros *low-e* recebem uma camada ultrafina de um metal de baixa emissividade de um dos lados. Os revestimentos *low-e* refletem menos luz visível, mas limitam a entrada de energia solar, reduzindo a carga térmica interna e, conseqüentemente, o consumo energético para condicionamento do ar. Além disso, apresentam alto nível de transparência e baixa reflexão, permitindo um melhor aproveitamento da iluminação natural. Dependendo da posição que a camada de metal é aplicada, o vidro pode reduzir o ganho de calor solar em climas muito quentes ou manter os ambientes aquecidos em climas muito frios (ANDREIS; BESEN; WESTPHAL, 2014).

c) vidro absorvente: é composto por um vidro plano que se torna colorido pela adição de óxidos. A pigmentação diminui a transmissão da onda curta com um pequeno aumento da absorção da parte visível (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014);

d) vidro duplo com câmara de ar (Insulado): formado por duas lâminas de vidro afastadas por uma câmara de ar. Essa camada de ar funciona como um isolante, reduzindo a transmitância térmica (U) e minimizando as transferências de calor de um ambiente para o outro.

Os principais fatores que intervêm nas transferências térmicas do envelope construtivo são a transmitância térmica (U) e o fator solar (FS), enquanto a *tvis* é um fator importante a ser considerado no que diz respeito as questões lumínicas. A transmitância térmica é a variável mais importante para avaliação do desempenho de fechamentos opacos, estando relacionada com a transmissão de calor por unidade de

tempo através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo e apresentando como unidade de medida $W/m^2.k$ (INMETRO, 2021).

Já o fator solar é fundamental para conhecer a quantidade de calor que penetra em um ambiente através das áreas envidraçadas, podendo ser entendido como a razão entre a quantidade de energia solar que atravessa o vidro pelo que nele incide. Internacionalmente, o FS é conhecido por *Solar Heat Gain Coefficient* (SHGC).

Por meio da utilização de sistemas de aberturas com baixo fator solar, é possível controlar a entrada de calor para o interior do ambiente, levando-se em consideração o acesso à luz natural, que não deve ser reduzido na mesma proporção da entrada de calor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A *tvis* é o fator que quantifica a quantidade de luz visível que passa através dos vidros. Para a luz natural, a *tvis* deve ser alta em comparação com a transmissão do infravermelho solar (LECHNER, 2015). Em estudo realizado por Liu *et al.* (2021), foi constatado que à medida que a *tvis* do vidro aumenta, ocorre o mesmo com a iluminância do espaço interno, ao mesmo tempo em que o brilho intolerável é ampliado. Em função disso, é fundamental atentar-se aos dados de *tvis* do vidro, de forma a favorecer o acesso à luz natural sem comprometer o conforto visual dos ocupantes.

2.3 Desempenho de fachadas

As características da fachada, considerada o elemento construtivo de maior área nas edificações em altura, têm influência direta no consumo de energia nos edifícios e consequentemente nos impactos ambientais (BRUGNERA, 2018). Segundo Napier (2015), a fachada deve admitir a luz do dia, limitar o ganho de calor solar, controlar o ofuscamento e dar privacidade. Para fazer isso, a área envidraçada deve ser organizada de acordo com a posição solar e o entorno do edifício.

É importante que a fachada seja compreendida como o meio pelo qual ocorrem trocas de energia, iluminação e ventilação, sendo, portanto, responsável pelo conforto ambiental dos usuários e um dos principais elementos da envolvente que contribuem no desempenho térmico da edificação. Quando se trata de conforto térmico, as áreas envidraçadas das fachadas merecem atenção, pois contribuem de forma significativa para o aumento da temperatura nos espaços internos.

Dessa forma, a envolvente do edifício tem uma importante função tanto na admissão quanto no controle ambiental externo, podendo compreender cerca de 80%

das soluções para a criação de um edifício eficiente (ETMAN; TOLBA; EZZELDIN, 2013). Carvalho, La Rovere e Gonçalves (2010) analisaram quais elementos da envoltória apresentam maior potencial de redução do consumo de edificações comerciais na cidade do Rio de Janeiro-RJ. Esses concluíram que, em edificações comerciais em altura, alterações nos materiais aplicados às fachadas tendem a proporcionar maior impacto no desempenho energético de edificações do que modificações nos materiais das coberturas.

Planas, Cuerva e Alavedra (2018) avaliaram quais parâmetros da fachada apresentam maior influência nos desempenhos energético e lumínico de oito edifícios de escritório representativos de Barcelona, por meio de simulações computacionais no *software Tas Engineering*. Os resultados demonstraram que a composição da fachada é um fator significativo para o aumento ou diminuição da carga térmica interna e que fachadas com alto fator solar (FS) apresentam considerável influência nas demandas para resfriamento da edificação, apresentando ampla influência da orientação solar, fato que não acontece em fachadas com baixo FS.

No que diz respeito à iluminação natural, os casos com maiores PAF e alto FS apresentaram maior acesso a luz do dia e, conseqüentemente, maior consumo para resfriamento da edificação. Além disso, o uso de algum tipo de sombreamento no edifício contribuiu para a redução dos níveis de iluminação, embora a inserção desses artifícios tenha influenciado a minimização das cargas térmicas para resfriamento.

Os vidros se destacam quando se trata de transmissão de calor através da envoltória, uma vez que, nestes elementos, as trocas são mais diretas e intensas devido à sua transparência à radiação solar e à elevada transmitância térmica. Em função da transparência à radiação de ondas curtas e da opacidade à radiação de ondas longas oriundas das superfícies aquecidas no interior do ambiente, o vidro contribui para o efeito estufa nos espaços internos, já que a transmissão de calor por condução é mais lenta do que o ingresso da radiação solar (PINTO, 2017).

Segundo Lee *et al.* (2013), a transmitância dos elementos transparentes costuma ser cinco vezes maior do que outros componentes opacos do envelope da edificação. Devido a esse fato, cerca de 20 a 40% da energia total do edifício é dissipada através das áreas envidraçadas.

Dessa forma, edifícios envidraçados costumam fazer amplo uso de condicionamento artificial para climatização, sendo consenso na literatura que quanto maior o PAF maior é a demanda energética da edificação (ANDREIS, 2014;

BRUGNERA *et al.*, 2019; DE OLIVEIRA; HELENA; MARQUES, 2017). Esse fato demonstra a importância da escolha adequada desse elemento construtivo, pois o mesmo é fundamental para o desempenho energético dos edifícios, apresentando influência direta no sistema de condicionamento artificial do ar e da iluminação artificial (LIU, 2010).

Brugnera *et al.* (2019) realizaram um estudo com o objetivo de classificar e caracterizar o desempenho energético de edifícios de escritórios de planta livre com diferentes tipologias de fachada, sendo elas tradicional e cortina, por meio de simulação computacional no *software EnergyPlus*. Os resultados apontaram que a fachada cortina aumentou o consumo de energia em quase todos os cenários analisados, da mesma forma que o aumento do PAF. Em relação aos vidros, o incolor apresentou o pior desempenho. Em Curitiba-PR e São Paulo-SP, o vidro refletivo reduziu a demanda energética, seguido do vidro *low-e* e do duplo, já em Manaus, o vidro duplo apresentou melhores resultados. A adoção de dispositivos de sombreamento sempre gerou economia de energia.

Sob o mesmo enfoque, Andreis *et al.* (2014) avaliaram o desempenho energético de edifícios de escritórios com diferentes soluções de fachadas, sendo elas tradicional e cortina, em zonas bioclimáticas brasileiras distintas, por meio de simulação computacional no *software EnergyPlus*.

Os autores identificaram que as fachadas tradicionais (vidro apenas nas esquadrias), apresentaram desempenho energético superior quando comparadas as revestidas por vidro. Além disso, foi verificado que, embora o PAF tenha influência nos resultados de consumo energético, a especificação do tipo adequado de vidro pode contribuir com o melhor desempenho do edifício.

Em outro estudo, realizado por De Oliveira e Marques (2017), por simulações computacionais no *software EnergyPlus*, considerando fachadas altamente envidraçadas em São Paulo-SP, foi possível perceber a importância do uso de vidros de controle solar, uma vez que o vidro incolor aumentou quase em duas vezes o consumo de resfriamento, quando comparado aos de controle solar. O PAF também fomentou o aumento da carga térmica do edifício, enquanto dos parâmetros analisados, o uso de dispositivos de sombreamento foi o que apresentou os melhores resultados para a redução da demanda para resfriamento.

Como demonstrado pelos estudos de Brugnera *et al.* (2019), Planas, Cuerva e Alavedra (2018) e De Oliveira e Marques (2017), a adição de dispositivos de

sombreamento é uma estratégia eficaz para a redução do consumo de energia, uma vez que por intermédio do seu uso é possível controlar a incidência solar, minimizando os ganhos de calor e ofuscamento nos ambientes. Entretanto, quando analisados apenas do ponto de vista térmico, o uso desses elementos pode significar a diminuição do nível de iluminação e/ou aumento ou diminuição da qualidade da distribuição luminosa interna (DÍAZ, 2011), ao passo que, se considerados apenas os requerimentos visuais, esses podem levar a edificações frias no inverno e quentes no verão. Nesse sentido, a fim de encontrar a solução de fachada ideal, faz-se necessária a busca pelo equilíbrio entre as variáveis lumínicas e termoenergéticas, que devem ser estudadas simultaneamente.

Para De Macêdo (2002), é no correto dimensionamento dos elementos de sombreamento que se encontra a chave para níveis lumínicos adequados, distribuições luminosas uniformes e ganhos térmicos reduzidos. Para David *et al.* (2011), o desenho dos elementos de controle solar deve prover proteção solar efetiva e níveis luminosos adequados. No entanto, os autores afirmam que a combinação ideal, que proporciona a redução do consumo energético, é um desafio a ser alcançado.

Chi, Moreno e Navarro (2017), em estudo realizado em Sevilha, constataram que o uso de telas perfuradas (37,5% de perfuração) como estratégia de sombreamento em edifícios envidraçados, orientados a sul (norte no Brasil), aumentou em 50% o aproveitamento da luz natural e reduziu em 63% os ganhos de calor provenientes da radiação solar, quando comparada a uma fachada totalmente envidraçada. Em uma segunda análise, identificaram que a mesma fachada de vidro com tela perfurada (37,5% de perfuração) se mostrou mais vantajosa do que uma fachada tradicional com PAF de 37,5%.

Na mesma linha de pesquisa, Lavin e Fiorito (2017) avaliaram, pela simulação computacional nos softwares *Daysim* e *EnergyPlus*, a performance térmica e lumínica de um escritório de planta livre e fachada envidraçada (PAF de 45%), com o incremento de uma tela perfurada, na Austrália. O edifício foi comparado a um Caso Base, com configuração semelhante, porém sem dispositivo de sombreamento.

Foi observado que a inclusão de um elemento de controle solar produziu melhorias significativas em termos de distribuição da iluminância útil, além de reduzir substancialmente a demanda de energia para refrigeração (de 27% para 63%), uma vez que a tela consegue agir como um filtro contra a radiação solar direta. Assim como

no estudo de Chi, Moreno e Navarro (2017), as cargas térmicas para iluminação artificial e aquecimento aumentaram, entretanto, também houve uma redução considerável da necessidade de resfriamento. O uso da tela perfurada também permitiu minimizar o excesso de brilho, reduzindo o ofuscamento sem perder a transparência à visual externa.

Problemas relacionados ao ofuscamento são comuns em fachadas com grandes panos de vidro e ausência de proteção solar. Para minimizar o excesso de brilho, que prejudica a execução de tarefas laborais, os usuários costumam acionar proteções solares internas como telas e persianas que limitam ou mesmo impedem a introdução da luz solar (PEREIRA, 2017). Esse fato suprime os benefícios advindos do uso de fachadas envidraçadas, impedindo o contato interior e exterior e limitando a admissão da luz diurna, em função da ausência de estratégias de projeto que fomentem o acesso à luz natural sem prejudicar o desempenho térmico do edifício.

Uma outra forma de minimizar o impacto de grandes áreas envidraçadas na carga térmica do edifício ocorre por meio da redução do efeito da absorção solar pelo vidro. O vidro seletivo é um desses exemplos, pois transmite luz visível média-alta ao mesmo tempo em que reduz a radiação térmica absorvida pelo vidro e transmitida para os ambientes internos.

Os vidros de controle solar e os dispositivos de sombreamento permitem controlar a carga térmica e a admissão da luz do dia. Os primeiros apresentam um comportamento espectralmente seletivo, minimizando a radiação transmitida em determinadas frequências de onda, porém, sem interferir de forma significativa na distribuição da luz. Já os dispositivos de sombreamento promovem uma seleção espacial da radiação solar, permitindo a entrada de luz do sol nos meses mais frios e barrando-a nos meses mais quentes, atuando, dessa forma, como difusores de luz e de radiação solar direta (FELIPPE, 2016).

Fasi e Budaiwi (2015) investigaram o impacto da integração da luz natural no consumo energético do edifício e no conforto visual, em uma região de clima quente. Identificaram que a introdução do vidro duplo *low-e* fomentou a redução do consumo de energia em 16%; seguido do vidro colorido, com 15%; e do vidro duplo incolor, com 14%; entretanto, em nenhuma das análises o tipo de vidro favoreceu o conforto visual. O acréscimo de um dispositivo de sombreamento mostrou-se uma opção vantajosa por fomentar o conforto visual e reduzir o consumo de energia, sendo que o vidro duplo *low-e* apresentou os melhores desempenhos nestes quesitos. Todavia, a

redução na demanda global de energia do edifício foi pequena, pois a introdução do dispositivo de controle solar minimizou o consumo para resfriamento, assim como ampliou a necessidade de iluminação artificial.

O uso de fachadas de pele dupla pode ser uma opção viável quando o uso do vidro é desejado, pois quando bem projetado, pode favorecer o desempenho do edifício. Em climas quentes, especificamente na cidade de Gazimagusa, em Chipre, Alibaba e Ozdeniz (2016) avaliaram o desempenho energético e o conforto térmico de um edifício de escritórios com fachadas simples e duplas utilizando o *software* TAS. Foram analisadas cavidades de 0,3m e 1,5m para orientações norte e sul, respectivamente.

Os autores citados concluíram que as fachadas duplas ventiladas apresentaram bom resultado para o período de inverno, porém no verão seus benefícios foram limitados. Em uma fachada simples, as perdas de calor no inverno chegaram a ser três vezes maiores, enquanto no verão os ganhos chegaram a cinco vezes mais quando comparados a uma fachada dupla, em função do maior isolamento da última.

Por meio de uma revisão de literatura, Barbosa e Ip (2014) identificaram os principais parâmetros que interferem no desempenho termoenergético de fachadas duplas ventiladas naturalmente, sendo eles: as características da camada externa da fachada (propriedades térmicas do envidraçamento) e da cavidade (altura e profundidade, tipo de geometria, área de abertura); os parâmetros relacionados às configurações físicas do edifício; e o contexto climático onde o mesmo está inserido.

No mesmo viés, Alberto, Ramos e Almeida (2017) investigaram o efeito de parâmetros como: geometria da cavidade ventilada, o caminho do fluxo de ar, a profundidade da cavidade, a área de abertura e o tipo de vidro no desempenho termoenergético de um edifício de escritórios de fachada dupla ventilada, localizado na cidade de Porto, em Portugal. O método utilizado foi a simulação computacional pelos *softwares* *Design Builder* e *EnergyPlus*, combinada a análises de Dinâmica computacional de fluidos (CFD).

Os resultados indicaram que o caminho do fluxo de ar é determinante no desempenho de uma fachada dupla, sendo a solução com cortina de ar externa – onde o ar entra pela abertura inferior da fachada e é extraído pela superior – a mais eficiente. A geometria multipavimentos se mostrou a mais vantajosa, reduzindo o consumo para climatização artificial em 30%. Além disso, foram analisadas diferentes

profundidades de cavidades (0,25m, 0,50m e 1,00m), a partir do que foi constatado que em cavidades maiores a demanda de energia por ar-condicionado foi reduzida em todas as situações analisadas, quando comparadas a uma fachada cortina tradicional. O aumento do percentual de abertura da cavidade favoreceu o fluxo de ar, resultando na redução da temperatura da cavidade e, conseqüentemente, na demanda para resfriamento. A redução do fator solar do vidro também contribuiu com a redução do consumo de energia em 9%.

Torres *et al.* (2007) analisaram um edifício comercial de sete andares com fachada dupla, localizado na cidade de Barcelona, clima mediterrâneo. As simulações foram realizadas no *software* TAS e os parâmetros avaliados foram a profundidade da cavidade (0,4m, 0,6m, 0,8m e 1,00m), as dimensões da abertura externa para saída de ar e a geometria da cavidade (corredor e multipavimentos). As simulações demonstraram que em fachadas com geometria do tipo corredor, cavidades maiores apresentaram desempenho superior, ao passo que cavidades estreitas combinadas com a maior área de abertura para entrada e saída do ar da cavidade se mostraram mais eficazes na geometria multipavimentos, ao acentuar a taxa de ventilação e o efeito chaminé, contribuindo, dessa forma, para a redução das demandas para resfriamento. A área de abertura apresentou maior influência do que a variação na profundidade da cavidade.

Khalifa *et al.* (2017) investigaram os efeitos da composição da camada interna em um edifício com fachada dupla e geometria *box-window* com 30cm de profundidade, na cidade de Túnis, clima mediterrâneo. Os autores identificaram que o maior PAF da camada interna pode aumentar substancialmente a carga térmica para resfriamento da edificação, enquanto o tipo de envidraçamento se mostrou fundamental para melhora no desempenho do edifício. Os vidros reflexivo e de controle solar se mostraram vantajosos, reduzindo a demanda por resfriamento.

No contexto brasileiro, Góes, Amorim e Silva (2020) simularam no *software* *Design Builder* e *EnergyPlus* o desempenho termoenergético de um edifício comercial com fachada dupla ventilada do tipo multipavimentos, para a cidade de Brasília-DF. Foram avaliados a orientação solar, a profundidade da cavidade (0,5m, 1,0m, 1,5m, 2,0m e 2,5m) e o uso de dispositivos de sombreamento. Os resultados apontaram que, em fachadas duplas, a orientação e a profundidade da cavidade possuem impacto relevante no seu desempenho. Para os autores, a utilização dessa tipologia construtiva não foi considerada adequada para o clima quente de Brasília, uma vez

que aumentou as cargas térmicas para resfriamento da edificação, apresentando desempenho inferior, quando comparado a uma fachada cortina tradicional (uma pele de vidro). Entretanto, a fachada dupla híbrida (com dispositivo de sombreamento) melhorou o desempenho do edifício em 10%, quando comparado à fachada tradicional.

Mazzarotto (2011) investigou o desempenho termoenergético de um edifício comercial com fachada dupla para a cidade de Curitiba-PR, comparado a modelos de edifícios com fachadas simples. A autora investigou a influência de diferentes tipos de cavidades (0,40m, 0,60m, 0,80m, 1,00m e 1,20m) em uma fachada dupla do tipo corredor. Concluiu que essa tipologia de fachada é adequada para o contexto climático de Curitiba, favorecendo o desempenho do edifício e o conforto dos ocupantes. Para a autora, a cavidade ventilada de 0,40m se mostrou a mais adequada.

Pomponi, Barbosa e Piroozfar (2017) desenvolveram uma análise comparativa de conforto térmico de um edifício de nove pavimentos com fachada dupla ventilada e geometria multipavimentos, para as cidades de Londres (orientações sul, sudoeste e sudeste) e Rio de Janeiro (norte, noroeste, nordeste). O modelo foi analisado com cavidade de 1,00m, contendo dispositivos de sombreamento do tipo veneziana por intermédio de simulação computacional no *software* IES VE, combinado a análises de Dinâmica computacional de fluidos (CFD). Os resultados demonstraram que, para a maior parte do ano, a fachada dupla ventilada pode fornecer condições interiores confortáveis sem qualquer necessidade de aquecimento ou resfriamento mecânico. Os melhores índices de conforto térmico foram registrados em Londres, com 85% de conforto térmico ao longo do ano, enquanto que para o Rio de Janeiro a taxa de conforto foi de 61%.

No que diz respeito à iluminação, entre os principais benefícios encontrados em fachadas envidraçadas está o acesso à luz natural, uma vez que, quando integrada à iluminação artificial, ele pode minimizar o consumo de energia, além de trazer benefícios para a saúde e o bem-estar dos usuários. Estudos como os de Shameri *et al.* (2013), realizados para diferentes contextos climáticos, demonstram que a inserção de uma pele de vidro extra pode impactar diretamente o acesso à luz solar no interior do edifício. Dessa forma, do ponto de vista da eficiência energética, avaliar o edifício como um todo pode ser determinante na escolha de qual o melhor sistema construtivo a ser utilizado.

Shameri *et al.* (2013) avaliaram, por simulação computacional no *software Environmental Solutions Virtual Environment (IES VE)*, o impacto de diferentes tipologias de fachadas duplas (DSF) na iluminação natural sob condições de céu nublado, em diferentes climas. Pela análise do Fator de luz diurna (*Daylight Factor – DF*), os autores identificaram que, independentemente do sistema de fachada ventilada adotado, seu uso impacta diretamente na distribuição da iluminação interna em edifícios de escritórios. Das 12 tipologias analisadas, nenhuma atendeu aos requisitos mínimos de iluminância interna de 200lux em 75% do espaço em nenhuma das condições de iluminância externa analisada. A iluminância interna foi alcançada em maior percentual nos países de clima subtropical analisados, embora não tenha sido o suficiente para conforto dos usuários.

Em relação às ferramentas computacionais, Andelkovic, Mujan e Dakic (2016) validaram a simulação computacional de fachadas duplas ventiladas no *software EnergyPlus*, pelo uso do objeto *Airflow Network*. O processo quantificou a precisão dos resultados obtidos por simulação e comparou aos encontrados em medições *in loco* em um edifício de escritórios com fachada dupla ventilada multipavimentos, localizado em Belgrado, na Sérvia. Os autores concluíram que os resultados da simulação computacional representam uma boa previsibilidade dos valores reais (medidos), sendo essa altamente confiável em termos de avaliação futura do desempenho térmico do edifício.

CHAN *et al.* (2009) também validaram o uso do *software EnergyPlus* para simulações de fachadas duplas ventiladas, em experimentos realizados na cidade de Hong Kong, na China. Os trabalhos de Andelkovic, Mujan e Dakic (2016), assim como de CHAN *et al.* (2009) tornaram-se importantes para esta pesquisa ao validar o método de análise realizado.

Pelo estudo dos trabalhos abordados foi possível perceber que as fachadas contribuem de forma significativa no desempenho do edifício, podendo favorecer a redução do consumo de energia ao funcionar como uma barreira seletiva em relação às condições climáticas, permitindo manter condições de conforto interior sem recurso a sistemas mecânicos de climatização, ou, pelo menos, reduzindo ao mínimo a necessidade de recorrer a este tipo de sistema.

Dessa forma, dentre os diversos elementos constituintes dos edifícios, as fachadas surgem como um meio privilegiado para atuar e propor soluções, uma vez que influenciam no consumo de energia do edifício e no conforto dos seus ocupantes.

Devem, assim, ser abordadas como elementos importantes que carecem de estudo aprofundado, de forma que sejam encontradas as soluções mais adequadas (SACHT et al., 2012).

2.3.1 Síntese do estado atual da arte sobre desempenho de fachadas

A partir da revisão de literatura sobre o tema desempenho de fachadas, foram sintetizados na Tabela 1 os principais métodos e parâmetros analisados nos trabalhos apresentados, que consideraram fachadas envidraçadas em edificações comerciais.

Tabela 1 - Síntese estado atual da arte sobre desempenho de fachadas envidraçadas

AUTOR/ANO	LOCALIZAÇÃO	ANÁLISE	MÉTODO	PARÂMETROS
PLANAS; CUERVA; ALAVEDRA (2018)	Barcelona/Espanha	DL e DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Fator solar da fachada; PAF; Dispositivo de sombreamento
BRUGNERA et al. (2019)	Curitiba, São Paulo, Manaus/Brasil	DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Tipo de fachada (tradicional x cortina); PAF; Dispositivo de sombreamento
ANDREIS et al. (2014)	Curitiba, São Paulo, Porto Alegre, Brasília, Rio de Janeiro, Salvador e Recife/ Brasil	DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Tipo de fachada (tradicional x cortina); PAF; Tipo de vidro; Dispositivo de sombreamento
DE OLIVEIRA; MARQUES (2017)	São Paulo/Brasil	DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Fachada envidraçada. PAF; Tipo de vidro; Dispositivo de sombreamento
CHI; MORENO; NAVARRO (2017)	Sevilha/Espanha	DL e DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i> , <i>DIVA/Grasshopper/</i> <i>Archsim</i>	Fachada cortina x Fachada cortina com tela perfurada x fachada tradicional
LAVIN; FIORITO (2017)	Sydney/Austrália	DL e DT	Simulação computacional <i>Daysim/</i> <i>EnergyPlus</i>	Dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada. Qualidade da iluminação x consumo de energia
FASI; BUDAIWI (2015)	Dhahran/Arábia Saudita	DL e DT	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Tipo de vidro; Qualidade da iluminação x consumo energético

DL = Desempenho lumínico; DT= Desempenho termoenergético

Fonte: AUTORA, 2021

Por meio dos dados contidos na Tabela 1, foi possível observar que os principais parâmetros avaliados estão relacionados à presença ou não de dispositivos de sombreamento, à influência do PAF, do tipo de vidro, da orientação solar, além da tipologia da fachada, sendo comparadas, normalmente, fachada tradicional com a cortina de vidro. Observou-se também que há uma lacuna na abordagem de forma

conjunta de análise, bem como na busca pelo ponto de equilíbrio entre os desempenhos lumínico e térmico.

O estudo do estado atual da arte permitiu identificar que a configuração construtiva das fachadas envidraçadas, a proteção solar, os tipos de vidro, o PAF e a orientação solar são determinantes nos desempenhos lumínicos e energéticos das edificações. Entretanto, a bibliografia consultada também evidenciou a falta de dados sobre a qualidade da iluminação proporcionada pelas fachadas envidraçadas sem a presença de dispositivos de sombreamento.

Essa lacuna também foi observada quando se lança atenção ao desempenho de fachadas duplas ventiladas naturalmente. As principais variáveis analisadas, na bibliografia consultada, considerando fachadas duplas, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Síntese estado atual da arte sobre desempenho de fachadas duplas ventiladas naturalmente

AUTOR/ANO	ANÁLISE	LOCALIZAÇÃO	MÉTODO	PARÂMETROS
ALIBABA; OZDENIZ (2016)	DT	Gazimagusa/ Chipre	Simulação computacional TAS	Consumo energético; Profundidade da cavidade; Orientação solar
BARBOSA; IP (2014)	DT	-	Revisão de literatura	Tipo de vidro da camada externa; Características da cavidade ventilada; Configuração do edifício; Contexto climático
ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA (2017)	DT	Porto/ Portugal	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i> + CFD	Geometria da cavidade; Fluxo de ar; Profundidade da cavidade; Abertura da cavidade para entrada e saída de ar; Tipo de vidro.
TORRES <i>et al.</i> (2007)	DT	Barcelona/ Espanha	Simulação computacional TAS	Tipo de vidro; Profundidade da cavidade; Percentual de abertura da cavidade para entrada e saída de ar; Geometria da cavidade.
KHALIFA <i>et al.</i> (2017)	DT	Túnis/ Tunísia	Simulação computacional TRANSYS e CONTAM	Constituição da camada interna; PAF; Tipo de vidro
GÓIS; AMORIM; SILVA (2020)	DT	Brasília/ Brasil	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Orientação solar; Profundidade da cavidade; Dispositivo de sombreamento
MAZZAROTTO (2011)	DT	Curitiba/ Brasil	Simulação computacional <i>EnergyPlus</i>	Profundidade da cavidade
POMPONI; BARBOSA; PIROOZFAR (2017)	CT	Rio de Janeiro e Londres/Brasil e Inglaterra	Simulação computacional IES+CFD	Geometria multipavimentos; Cavidade 1,00m; Contexto climático

SHAMERI <i>et al.</i> (2013)	DL	-	Simulação computacional -IES	Contexto climático; Tipologia de fachada dupla; Qualidade da iluminação, <i>Daylight Factor</i> (DF)
------------------------------	----	---	------------------------------	--

DT = Desempenho termoenergético CT= Conforto térmico DL= Desempenho lumínico

Fonte: AUTORA, 2021

Pôde-se observar que os principais parâmetros analisados estão relacionados às características da camada externa, como a geometria e a profundidade da cavidade, o tipo de vidro e o percentual de abertura da cavidade para entrada e saída de ar.

Huang e Niu (2015) realizaram uma pesquisa sobre a otimização do envelope construtivo baseado em simulações computacionais. Os autores apontaram que cerca de 80% dos estudos existentes sobre este assunto estão relacionados à redução do consumo energético da edificação, sendo os principais parâmetros de análise: i) Transmitância térmica (valor de U); ii) Absortância; iii) *Window-to-wall ratio* (WWR), aqui denominado PAF; iv) tipo de vidro; v) espessura do material de isolamento; vi) formato do envelope construtivo e vii) presença/dimensão de dispositivos de proteção solar. Por meio desses resultados, corroborou-se a necessidade de estudos que contemplem iluminação natural e desempenho energético de forma combinada.

2.4 Desempenho lumínico

O desempenho lumínico em edificações diz respeito à avaliação do comportamento da iluminação, seja ela natural ou artificial, estando relacionado ao conforto visual dos usuários e ao menor consumo de energia elétrica dos sistemas de iluminação artificial. Dessa forma, o desempenho da iluminação relaciona-se a iluminâncias adequadas às atividades exercidas no ambiente e a qualidade desta iluminação, tendo em vista a ausência de ofuscamento (PEREIRA, 2017).

Para Díaz (2011), o conforto visual pode ser definido como a sensação psicofisiológica que expressa satisfação com o ambiente luminoso ao redor, estando relacionado ao campo visual e ao plano de trabalho.

Uma boa qualidade da iluminação ajuda a melhorar o desempenho visual das tarefas, ajuda na comunicação interpessoal e melhora o sentimento de bem-estar, ao passo que uma iluminação de má qualidade pode eliminar os benefícios advindos com a luz natural, podendo gerar desconforto, ser confusa e prejudicar o desempenho visual (IESNA, 2011). Uma iluminação de boa qualidade deve integrar desempenho

visual, conforto visual, qualidade da visual externa, eficiência energética e satisfação do usuário (FERNANDES, 2016).

O nível de iluminação é uma importante característica desta, assim como a distribuição de seus diferentes valores pelo ambiente. Quando se trata de em qualidade da visão, o nível ótimo de iluminação é aquele que proporciona aos usuários a melhor visão, um reconhecimento fácil da mensagem visual sem causar cansaço visual (GONÇALVES; VIANNA; MOURA, 2011).

Segundo Gonçalves, Vianna e Moura (2011), os níveis de iluminação apresentam dois fatores limitantes: i) o econômico, uma vez que níveis máximos de iluminação, podem contribuir com o aumento do consumo de energia para iluminação artificial; e ii) o aspecto qualitativo da luz, em que níveis excessivos de iluminância ou contrastes no campo visual podem levar a dificuldades ou até mesmo ao impedimento da visualização do objeto, devido à ocorrência de problemas relacionados ao ofuscamento.

Segundo a NBR 8995-1 (ABNT, 2013), o ofuscamento é a sensação visual produzida por áreas brilhantes dentro do campo de visão, podendo ser ele desconfortável ou inabilitador. O primeiro não impede o desenvolvimento da tarefa visual, enquanto o segundo pode limitar a visão e impedir a realização do trabalho, pois causa uma sensação de cegueira momentânea.

A Figura 7 apresenta exemplos de ofuscamento em espaços internos.

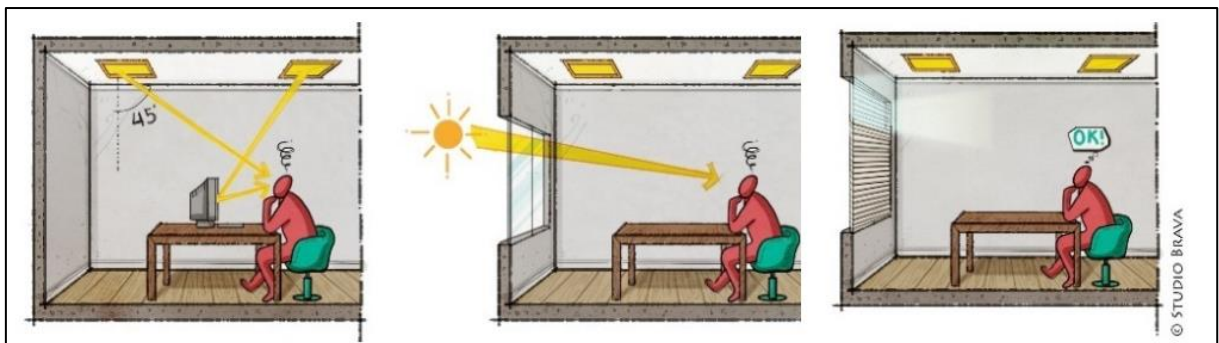


Figura 7 - Exemplos de ofuscamento causados por iluminação artificial e iluminação natural
Fonte: FERNANDES, 2016, p. 71

Ambientes comerciais devem ter como pré-requisito a não incidência de radiação solar direta no plano de trabalho, a fim de evitar o ofuscamento. Em espaços de escritórios, é muito comum os usuários fazerem uso de persianas internas para a proteção da radiação direta. Este fato minimiza a disponibilidade de iluminação natural no interior do ambiente e não impede o aumento da carga térmica, levando, muitas

vezes, ao acionamento da iluminação artificial e, conseqüentemente, elevando o consumo energético da edificação (PEREIRA, 2017).

Boyce (2003) indica que o desconforto visual é um conceito muito relativo, uma vez que depende do tipo de ambiente, das experiências e desejos individuais. Entretanto, lista vários aspectos que podem causá-lo: nível de iluminação insuficiente ou excessivo, distribuição luminosa inadequada, contraste excessivo e tremulação da fonte, quando considerado iluminação artificial.

Fernandes (2016) estudou os efeitos da qualidade da iluminação. O estudo comprovou que os usuários preferem sentar-se próximos às janelas com intuito de aproveitar a luz natural e o contato para a área externa. Além disso, a satisfação do usuário em relação à visual para o exterior contribuiu para o aumento da tolerância ao ofuscamento no campo visual. De acordo com a autora, esta situação deve ser vista com cuidado, pois mesmo que o usuário demore a perceber o ofuscamento, esta condição por longos períodos pode contribuir com o aumento do cansaço e do estresse visual.

Assim, é importante compreender, mesmo que em análise preliminar, os fatores básicos relacionados ao desempenho lumínico edificações que devem ser levados em consideração em ambientes de trabalho, de acordo com a NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013): i) níveis mínimos de iluminância: quantidade mínima de luz no plano de trabalho que possibilite a realização das atividades pretendidas sem esforço visual; ii) uniformidade luminosa: distribuição uniforme dos níveis mínimos de iluminância pelo ambiente que dependem da forma, dimensões e posição das aberturas e dos coeficientes de reflexão das superfícies; iii) ausência de ofuscamento: evitar a incidência de luz solar direta nos planos de trabalho.

No que diz respeito às grandezas de iluminação, merece destaque o conceito de iluminância. Essa é a razão entre o fluxo luminoso e a área a ser iluminada. A unidade de medida da iluminância é o Lux [lx], sendo que uma iluminância de 1lx ocorre quando o fluxo luminoso de 1lm é distribuído uniformemente sobre uma área de 1m² (TREGUENZA; LOE, 2015). A iluminância está relacionada à luz incidente. A normativa brasileira de iluminação em ambientes de trabalho, NBR 8995-1 (ABNT, 2013), estabelece níveis mínimos de iluminância a serem mantidos dependendo do tipo de tarefa a ser executada no ambiente.

2.5 Luz natural e eficiência energética na arquitetura

Boyce, Hunter e Howlet (2003) estudaram os benefícios da luz natural proveniente das janelas, levando em consideração seus impactos sobre o desempenho e produtividade dos usuários e seus efeitos na saúde dos ocupantes. Os resultados apontaram que a luz natural estimula o sistema visual e circadiano do ser humano, sendo também um atrativo visual, que pode reduzir o estresse e melhorar o humor. Pessoas que preferem a luz natural costumam se sentir mais satisfeitas quando comparadas com indivíduos de mesma preferência que trabalham em locais com acesso limitado à luz do dia. Soma-se a isso o fato de os sistemas artificiais ainda não conseguirem representar todas as características positivas da luz diurna.

Condição semelhante foi comprovada por Veitch, Christoffersen e Galasiu (2013), que realizaram uma intensa revisão de literatura sobre o tema, ratificando os benefícios da luz do dia e ressaltando que o projeto ideal deve incluir tamanho e orientação dos vãos adequados, devendo as aberturas serem adaptáveis para conforto dos usuários.

Além disso, o aproveitamento da iluminação natural combinado a dispositivos eficazes e estratégias de projeto, podem aumentar significativamente a qualidade da iluminação nos espaços internos e, paralelamente, reduzir o consumo de energia nos edifícios. Diversos estudos, como os de Cammarano *et al.* (2015), Didoné e Pereira (2010) e Pellegrino *et al.* (2017), demonstram a importância da introdução da luz natural na busca por uma maior eficiência energética, principalmente em edifícios comerciais.

Neste contexto, uma das melhores formas de minimizar a demanda energética para iluminação se dá por meio da integração da luz natural a artificial por meio de sensores que acionam a iluminação quando a iluminância não é suficiente.

Sempre que a luz natural satisfizer as necessidades de iluminação do ambiente, a iluminação artificial deve ser desativada ou utilizada de forma a complementar a luz natural. O uso de sistemas de controle de iluminação artificial é fundamental para a efficientização da iluminação, pois, de acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014), pode-se confiar na maioria das pessoas para acionar a iluminação artificial, mas dificilmente para desligá-la quando essa não é mais necessária, condição confirmada por Signori (2015).

Xu *et al.*, (2016) analisaram o desempenho energético de diferentes sistemas de iluminação e estratégias de controle lumínico em um modelo de escritório de planta

livre localizado em Shanghai, na China. Os autores realizaram simulações de luz natural no *software Daysim* e energéticas no *EnergyPlus*, além de averiguar o comportamento dos usuários e o conforto visual. Os resultados apontaram que a utilização de dispositivos de controle de iluminação são ferramentas importantes para a redução do consumo energético, minimizando em 23% ou mais a demanda por iluminação artificial, além disso, quando combinados dimerização e sensores de presença, a economia estimada foi de 50%.

Resultado semelhante foi encontrado por Moura, Correa e Cunha (2020). Os autores identificaram que pela dimerização da luz artificial é possível reduzir em até 23% o consumo por iluminação artificial e que esta estratégia, combinada ao aproveitamento da luz natural, pode representar uma economia de 36% no consumo final de energia do edifício. Para Pellegrino (2017), a economia de energia com a integração da luz natural a dispositivos de controle pode chegar em média a 49%, em ambientes com autonomia de luz natural favorável.

Assim, pode-se afirmar que o aproveitamento da luz natural é uma ferramenta eficiente na redução do consumo energético de uma edificação, porém esta economia só é favorável se o uso da iluminação artificial for reduzido pelo acesso à luz natural e sem que a sua introdução traga prejuízos à carga térmica da edificação (PEREIRA, 2017).

2.6 Desempenho lumínico x desempenho termoenergético

A crescente consciência dos benefícios da luz natural resultou em uma maior necessidade de informações e dados sobre o impacto de diferentes tipologias arquitetônicas nos sistemas de iluminação e climatização das edificações (CAMMARANO *et al.*, 2015). Neste sentido, a utilização da luz natural e a análise do desempenho termoenergético nas edificações tornaram-se estratégias fortemente recomendadas pelos sistemas de avaliação de edifícios e intensamente investigadas por universidades e pesquisadores em todo o mundo (SANTOS, 2012).

A incidência solar é um tema abordado de forma bastante controversa. Se por um lado é tratada como um recurso conveniente que permite reduzir os custos com iluminação artificial, além de seus benefícios já comprovados na saúde e no bem-estar dos usuários, por outro, pode contribuir para o aquecimento excessivo dos ambientes, incrementando o consumo de energia para condicionamento térmico.

Uma iluminação de boa qualidade nem sempre é proporcional a grandes áreas envidraçadas, pois essas podem favorecer a ocorrência de ofuscamento e superaquecimento dos ambientes. Dessa forma, a escolha da configuração da fachada e de seus materiais podem determinar os níveis de iluminação e os ganhos de calor internos (MOURA, 2017).

Em edifícios comerciais, o consumo energético está diretamente relacionado aos ganhos e perdas de calor através da envoltória, combinado à quantidade de calor gerado no seu interior, devido à maior densidade de usuários, equipamentos e iluminação (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Dessa forma, a concepção de uma edificação energeticamente eficiente diz respeito à redução do consumo de energia elétrica, priorizando o conforto térmico, lumínico e acústico dos usuários. (VETTORAZZI, 2019, p. 112).

Moura, Britto e Cunha (2020) realizaram um estudo por intermédio de simulação computacional em um edifício administrativo. Os autores concluíram que a orientação solar apresenta forte influência nos desempenhos lumínico e termoenergético, promovendo diferenças de até 8,37% de autonomia de luz natural.

Tagliabue, Buzzetti e Arosio (2012) estudaram, com auxílio dos *softwares Daysim, Dialux e EnergyPlus*, os desempenhos lumínico e termoenergético em um edifício de escritórios na Itália. Os autores identificaram que uma fachada com PAF de 40%, com orientação solar norte, equivalente a sul no Brasil, apresentou resultados superiores em termos de conforto visual, sem grandes prejuízos ao consumo de energia, ao passo que o mesmo edifício, com orientação sul, apresentou maiores problemas de ofuscamento, introduzindo a necessidade do uso de dispositivos de controle solar.

Signorini (2015) realizou um estudo em um edifício administrativo da cidade de Pelotas-RS. A autora identificou que a ocorrência de ofuscamento, principalmente em dias de céu claro, com maior quantidade de radiação solar direta, contribuiu para o acionamento dos dispositivos internos de controle solar. Uma vez fechados, a interação dos usuários com esses dispositivos foi insignificante, permanecendo fechados mesmo em situações em que não havia mais desconforto visual.

Assim, este estudo, embora não faça uma análise energética, demonstra o impacto do ofuscamento no comportamento do usuário, que leva indiretamente ao aumento do consumo de energia, principalmente por iluminação artificial, ao interferir no comportamento do edifício.

De acordo com Gonçalves, Vianna e Moura (2011), cortinas e persianas não são bons protetores solar, uma vez que não eliminam a ocorrência do efeito estufa. A radiação solar que incide através dos vidros aquece as superfícies internas e se transforma em radiação de onda longa (calor) permanecendo em parte no espaço interno. Em função disso, elementos de controle solar externos são ideais, pois evitam a carga térmica indesejada no ambiente (MOURA, 2017). No entanto, devem ter seu dimensionamento adequado para que não interfiram nos níveis de iluminação.

Sistemas de persianas automatizados podem ser uma solução para barrar a radiação solar direta, minimizando o ofuscamento sem comprometer os níveis de iluminação. Esta condição foi corroborada pelo estudo realizado por Mettanant e Chaiwiwatworakul (2014), todavia, segundo Tabadkani *et al.* (2020), não há consenso na literatura sobre a eficácia de estratégias de controle de sombreamento automático, devido às dificuldades em se estabelecer um sistema de controle que não interfira no acesso à iluminação natural de qualidade, assim como em função da complexidade de avaliação dos níveis de iluminância aceitos por parte dos usuários.

A escolha adequada do tipo de vidro também pode contribuir com melhorias no aproveitamento da iluminação e no controle da carga térmica da edificação. Vidros seletivos ou de controle solar podem favorecer o acesso à luz natural ao mesmo tempo em que minimizam a radiação solar transmitida para o ambiente interno.

Em estudo realizado por Andreis *et al.* (2014) em diferentes cidades brasileiras, foi observado que em edificações com fachadas envidraçadas, o uso do vidro de controle solar favoreceu a adoção de PAF maiores (50% ou 60%), comparado a fachadas com vidros de fator solar elevado (incolor e verde) e área de vidro menor (30% ou 40%).

Situação semelhante foi encontrada por Pinto (2017), considerando vidros insulados para a região sul do Brasil. Nesta pesquisa, o aumento do PAF teve pouca influência no consumo para resfriamento da edificação quando considerados vidros com baixo SHGC. Fasi e Budawi (2015) identificaram que por meio do uso do vidro *low-e* foi possível reduzir a demanda energética do edifício em 16%.

Felippe (2016), em estudo realizado por simulação computacional, combinando os desempenhos lumínico e termoenergético, identificou que os dispositivos de sombreamento apresentaram desempenho superior aos vidros de controle solar, melhorando as condições de iluminação e os ganhos térmicos.

Pellegrino (2017) e Cammarano (2015) defendem que o desempenho global do edifício depende da combinação entre os resultados de desempenho lumínico e termoenergético. Neste contexto, a simulação computacional tem se destacado como um importante método de avaliação dos desempenhos lumínico e termoenergético de edificações, sendo importante instrumento na comparação de eficiência energética de diferentes soluções arquitetônicas e construtivas.

2.7 Simulação computacional

Softwares de simulação computacional têm sido amplamente utilizados em avaliações de desempenho lumínico e energético de edificações. Isso se deve à capacidade dos mesmos em desenvolver modelos complexos que envolvam uma grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares (ROCHA; PEREIRA, 2011).

A utilização da simulação computacional como um método para estimar o desempenho termoenergético de edificações está vinculado a cálculos de ganhos de calor do envelope construtivo e às cargas térmicas dos espaços internos. Os resultados desse método podem fornecer indícios sobre pontos que podem contribuir com melhorias no funcionamento do edifício, sendo um elemento crucial para o aumento da eficiência energética da edificação (HONG; CHOU; BONG, 2000).

O *software EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (USDOE), avalia o balanço termoenergético de edificações, sendo considerado pela *American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE 140) um método adequado para avaliação do desempenho térmico dos edifícios (ASHRAE, 2014).

Esse programa utiliza dados climáticos dos locais de estudo, geometria da construção, propriedades dos vidros e demais materiais empregados, além de especificações técnicas dos sistemas de ocupação, equipamentos, iluminação e usos da edificação.

O *software* gera dados de saída, em arquivos de texto, relacionados à temperatura, radiação incidente, carga térmica (global, para aquecimento e resfriamento, ventilação, iluminação e cargas internas), transmissão de calor e uso da água, entre outras possibilidades (PINTO, 2017).

Para auxiliar a modelagem da construção a ser avaliada, o *EnergyPlus* apresenta um *plugin* (*Euclid* ou *Legacy Open Studio*, dependendo da versão utilizada)

integrado ao *software SketchUp*, onde é possível desenvolver modelos geométricos com indicação de elementos de fechamento opacos ou translúcidos do edifício.

O *software EnergyPlus* também permite determinar o impacto da luz natural no consumo de energia da edificação. Entretanto, diversos autores comprovaram que o mesmo apresenta limitações no cálculo de iluminação natural, apresentando diferenças, quando comparado a outros programas que utilizam diferentes métodos de cálculo.

Ramos e Ghisi (2010), analisaram o cálculo da luz natural comparando as iluminâncias internas calculadas pelos *softwares EnergyPlus* e programas específicos de análise lumínica, como o *Daysim/Radiance* e *Troflux*. Os autores identificaram que os cálculos da parcela de luz refletida interna e das iluminâncias externas foram superestimados pelo *EnergyPlus*, e que as imprecisões no cálculo de luz natural se tornavam acentuadas à medida que aumentava a distância da fachada. Essas inconsistências influenciam diretamente as avaliações de iluminação natural, podendo interferir nos resultados de consumo para iluminação artificial.

Jakubiec e Reinhart (2011) confirmam que em geometrias complexas a estimativa de luz natural pode ser imprecisa no *EnergyPlus*.

Assim, uma das formas de contornar as limitações desse *software* ocorre pela realização de simulações computacionais que combinam análises energéticas realizadas no *EnergyPlus* com análises lumínicas realizadas em outros programas destinados a este fim. Diversos trabalhos têm feito uso desse método combinado, como os de Didoné (2009) e Lavin e Fiorito (2017), que utilizaram o *Energy Plus* e o *Daysim*; Chi, Moreno e Navarro (2017) que usaram *EnergyPlus*, *Grasshopper* e *DIVA*; e Moura, Correa e Cunha (2020), que utilizaram o *Rhinoceros* e *Energy Plus* (2017), entre outros.

Entre os *softwares* recentes que permitem a modelagem do edifício e a realização de simulações dinâmicas de luz natural, está o *Rhinoceros* em conjunto com o *plugin ClimateStudio*. Este *plugin* é distribuído e desenvolvido pelo Solemma LLC e permite uma série de avaliações de desempenho ambiental de edificações, por meio de dados baseados no clima (*Climate-Based Daylighting Metrics - CBDM*), além de possibilitar a análise de ofuscamento e a capacidade de calcular a carga energética de uma única zona térmica. Esse *software* atende a todos os requisitos definidos pela IES LM 83-12 (IESNA, 2012) e pela INI-C (INMETRO, 2021) para simulações de iluminação natural.

2.7.1 Métricas de avaliação

As avaliações de desempenho lumínico podem ser realizadas por medidas estáticas ou dinâmicas.

As medidas estáticas desconsideram as variações dinâmicas dos níveis de iluminação natural ao longo do dia e do ano e efetuam cálculos luminosos a partir de um céu de referência. A medida estática mais utilizada é o Fator de Luz Diurna (*Daylight Factor*, DF), que é definido como a relação entre a iluminância de um ponto no interior e a iluminância externa desobstruída medida sob um céu nublado padrão. Em função da distribuição luminosa uniforme do céu de referência, quando modificada a orientação solar, os resultados continuam os mesmos, sendo essa uma das principais limitações do seu uso (REINHART, 2006).

Devido a isso, as análises que utilizam o DF vêm sendo reconhecidas como inadequadas, justamente por desconsiderarem as diferenças quanto às variações de iluminância externa anual, fato que tem influência direta na avaliação da iluminância interna (MORAES; PEREIRA, 2014).

Já os indicadores dinâmicos conseguem quantificar as condições lumínicas naturais considerando as variações estacionárias anuais e horárias. Ainda são poucos os trabalhos no campo científico nacional abordando avaliações dinâmicas de desempenho de iluminação natural em espaços de trabalho (CAVALERI; CUNHA; GONÇALVES, 2018). No entanto, as pesquisas mais recentes têm realizado análises baseadas no clima, que permitem a predição quantitativa da luz usando condições realísticas do sol e do céu, obtidos por meio de arquivos climáticos dos locais a serem avaliados (PEREIRA, 2017). Dessa forma, os resultados das simulações retratam todas as condições de iluminação que ocorrem nos ambientes de edifícios submetidos a um céu real (MARDALJEVIC, 2012), incluindo suas variações ao longo do dia e do ano.

As métricas mais recorrentes em avaliações dinâmicas em ambientes de escritório são: a autonomia de luz natural (*Daylight Autonomy* - DA), a iluminância útil da luz natural (*Useful Daylight Illuminance* - UDI) e, mais recentemente, a autonomia de luz natural espacial (*Spatial Daylight Autonomy* - sDA) e a Exposição a luz solar direta (*Annual Sunlight Exposure* - ASE).

O *Daylight Autonomy* (DA) apareceu originalmente em 1989 em uma norma da organização *Internacional Association Suissedes Electriciens*, e foi redefinido por Reinhart e Walkenhorst em 2001 (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006). A

métrica DA corresponde ao percentual de horas/ano em que um nível de iluminância mínimo exigido é mantido no ambiente, representando um dado valor de iluminância alcançado no plano de trabalho.

Nesse caso, leva-se em consideração que a luz natural é suficiente durante a porcentagem de horas do ano em que o ambiente atinge no mínimo esse valor pré-determinado, não sendo necessário o uso de luz artificial. Embora esse indicador avalie condições dinâmicas anuais, o mesmo não permite averiguar níveis excessivos de iluminância e não prevê efeitos adversos associados ao desconforto visual e ao acréscimo da carga térmica (LEAL; LEDER, 2018), sendo essa a principal diferença entre o DA e o UDI.

O *Useful Daylight Illuminance* (UDI) foi desenvolvido em 2005 por Nabil e Mardaljevic (2005), possuindo como definição a ocorrência anual de iluminâncias no plano de trabalho que pertencem a uma faixa de valores considerada “útil” pelos ocupantes. Essa faixa de iluminância foi resultado de estudos de campo que registraram as preferências e o comportamento de usuários de edifícios naturalmente iluminados e qualificados por dispositivos de sombreamento (MARDALJEVIC, 2012).

Em um primeiro momento, como desejável, os autores consideraram uma faixa de iluminância útil entre 100-2000lux, todavia, pela atualização dos testes realizados, perceberam que valores abaixo de 100lux eram considerados muito baixos e que os acima de 3000lux eram excessivos para a realização de tarefas, podendo levar ao desconforto visual por ofuscamento e ao aumento da carga térmica interna. Dessa forma, essa métrica foi redefinida e a faixa de valores de UDI passou a ser dividida em três escalas: de 100-300lux, chamada de UDI suplementar, faixa de iluminância em que pode haver a necessidade de complementação com luz artificial; UDI autônoma, de 300-3000lux, em que é provável que uso da luz artificial não seja necessário; e UDI excessiva, superior a 3000lux (MARDALJEVIC, 2015).

Tabela 3 - Escalas de UDI

Iluminância < 100lux	UDI não é alcançada
100 < Iluminância < 300lux	UDI suplementar
300 < Iluminância < 3000lux	UDI autônoma
Iluminância > 3000lux	UDI excessiva

Fonte: Adaptado de MARDALJEVIC (2015)

Em 2012, a *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA) divulgou, por meio do protocolo IES LM 83-12, dois novos métodos de análise de desempenho lumínico ao longo do ano, sendo eles: a Autonomia de luz natural espacial ou *Spatial Daylight Autonomy* (sDA) e o Exposição solar direta anual ou *Annual Sunlight Exposure* (ASE).

A métrica sDA está relacionada à suficiência anual dos níveis de iluminação em ambientes internos, representando a porcentagem do espaço que apresenta um valor mínimo de iluminância, por um determinado período e podendo ser dividida em dois níveis de aceitabilidade: sDA preferencial ou aceitável, conforme critérios apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 - Critérios estabelecidos para a métrica de análise *Spatial Daylight Autonomy* (sDA)

<i>Spatial Daylight Autonomy</i>	
sDA 300lux/50% em no mínimo de 75% da área do ambiente	Preferencial (<i>Preferred Daylight Sufficiency</i>)
sDA 300lux/50% em no mínimo de 55% da área do ambiente	Aceitável (<i>Nominally Accepted Daylight Sufficiency</i>)

Fonte: Adaptado da IES LM 83-12 (IESNA, 2012)

Já a ASE corresponde a porcentagem de área do ambiente que excede 1000lux por mais de 250 horas ocupadas ao longo do ano, sendo representada pela sigla ASE 1000lux/250h. A ASE está relacionada ao conforto dos usuários, trata-se de um valor relativo que tenta delimitar condições de potencial desconforto visual geradas por incidência direta de sol no plano de trabalho (IESNA, 2012). Essa métrica pode ser definida de acordo com os critérios de conforto visual, contidos na Tabela 5:

Tabela 5 - Critérios estabelecidos para a métrica de análise *Annual Sunlight Exposure* (ASE)

<i>Annual sunlight exposure</i>	
ASE $\leq$ 3%	Favorável
ASE $\leq$ 7%	Aceitável
ASE $\geq$ 10%	Insatisfatório

Fonte: Adaptado da IES LM 83-12 (IESNA, 2012)

No que diz respeito à ASE, a IESNA (2012) reforça que as pesquisas que embasaram a definição desse 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, deve ser melhor estudada.

Outra métrica que permite estimar iluminâncias excessivas é o índice de probabilidade de ofuscamento da luz natural (*Daylight Glare Probability* – DGP), sendo esse um método de predição da ocorrência de desconforto visual que adota como parâmetro a iluminância do plano vertical no campo de visão do observador (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006). A escala de classificação, com valores acima de 0,45 e menores do que 0,35, corresponde a um percentual de 45% de pessoas em condições intoleráveis de ofuscamento e 35% em condições imperceptíveis, respectivamente.

Tabela 6 - Índice de probabilidade de ofuscamento da luz natural

<i>Daylight Glare Probability</i>	<i>Glare Comfort</i>
$DGP \leq 35\%$	Ofuscamento imperceptível
$35\% < DGP \leq 40\%$	Ofuscamento perceptível
$40\% < DGP \leq 45\%$	Ofuscamento perturbador
$45\% < DGP$	Ofuscamento intolerável

Fonte: Adaptada de WIENOLD; CHRISTOFFERSON, 2006

Em estudo realizado por Wielnold (2006), foi identificado um fator de correlação de 94% entre a métrica DGP e a resposta do usuário, em relação à percepção de brilho.

Para Reinhart e Wielnold (2011), para uma avaliação integrada do desempenho lumínico do edifício, é preciso analisar de forma conjunta a disponibilidade de luz natural, o conforto visual e as cargas térmicas por meio de simulação computacional.

2.8 Normas técnicas

No Brasil, as diretrizes da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) definem as questões de desempenho térmico das edificações, considerando habitações de interesse social. A mesma apresenta recomendações para os elementos da envoltória da edificação, como a transmitância térmica mínima de coberturas e paredes externas para cada zona bioclimática e também estratégias para obtenção de conforto térmico. Os cálculos para obtenção da resistência, capacidade e transmitância térmica de materiais e elementos construtivos e métodos de medição de condutividade térmica também são apontados na referida norma. São apresentadas também cartas de

zoneamento bioclimático para avaliação do desempenho térmico conforme a região em que se localiza a edificação.

O Brasil não apresenta normas de desempenho específicas para edificações comerciais. Em junho de 2009, foi aprovado, pela Portaria nº 163 do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Inmetro) (BRASIL, 2009b), o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) no país. Esse regulamento teve como objetivo criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética dos edifícios, especificando requisitos técnicos e métodos para classificação dos edifícios comerciais, de serviços e públicos.

Em fevereiro de 2021, a Portaria nº 42 do Inmetro, aperfeiçoou as regulamentações do RQT-C pela aprovação da Instrução Normativa do Inmetro para a classificação de eficiência energética de edificações, comerciais, de serviços e públicas (INI-C), também estabelecendo métodos e critérios de análise para classificação de eficiência energética dessas edificações.

A classificação parcial da edificação, baseada no consumo de energia primária, é dada por intermédio da envoltória completa, obrigatória em todas as avaliações, dos sistemas de condicionamento de ar, iluminação e aquecimento de água.

Para a classificação da eficiência energética, compara-se o consumo da edificação real com sua condição de referência – edifício com as mesmas características construtivas, tipologia arquitetônica, orientação solar, pé-direito e demais características com classe D de eficiência energética.

Na INI-C é possível estimar o consumo de energia da edificação por meio dos métodos simplificado e de simulação computacional. Além de estabelecer critérios para a avaliação do consumo energético do edifício, a INI-C traz recomendações para análise de iluminação natural, como aspectos relacionados ao *software* e regulamentações baseadas na IES LM-83 (IESNA, 2012), estabelecendo como métricas de análise a Autonomia de Luz Natural Espacial, sDA 300lux/50% e a Exposição a Luz Solar Direta, ASE 1000lux/250h.

Ademais, no que diz respeito à iluminação natural, além das recomendações da INI-C, no Brasil, a norma NBR 15215 (ABNT, 2003/04) traz conceitos e termos relacionados à iluminação natural, procedimentos e cálculos para estimá-la, assim como métodos de medições. Já as regras para iluminação em ambientes de trabalho são regulamentadas pela NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013). Esta norma considera

o nível de iluminância a ser mantido em espaços internos em função do tipo de ambiente ou tarefa a ser executada, respeitando limites, de modo a evitar desconforto por ofuscamento e índice de reprodução de cores mínimo. Além disso, apresenta condições mínimas de iluminação, permitindo que as pessoas desempenhem tarefas visuais de maneira eficiente, com conforto e segurança durante todo o período de trabalho. O valor de 500lux é definido por essa normativa como iluminância mínima a ser mantida em ambientes de escritório.

Estas normativas demonstram a importância da iluminação natural no desempenho das edificações, no entanto, ainda se faz necessário obter maiores informações a respeito de métodos de avaliação de luz natural e métricas de análise dinâmicas.

2.9 Considerações finais sobre as referências bibliográficas

A partir da revisão bibliográfica apresentada – que se estendeu durante todo o período de desenvolvimento desta dissertação – sobre desempenho lumínico e termoenergético em edifícios de escritórios, com destaque para o desempenho de fachadas, observou-se a tendência nos estudos sobre fachadas envidraçadas, principalmente seu impacto no consumo energético das edificações. Neste sentido, confirmou-se a importância do aproveitamento da luz natural de forma adequada como uma estratégia para minimizar o consumo para iluminação artificial.

Os trabalhos apresentados também demonstraram que ganhos térmicos andam em conjunto com o maior acesso à luz natural, influenciando diretamente na carga térmica da edificação. Diante da importância do tema, observou-se que são poucos os estudos que consideram de forma combinada a avaliação dos desempenhos lumínico e termoenergético, no que diz respeito à análise de fachadas envidraçadas, uma vez que a maioria dos trabalhos encontrados avaliam a combinação de ambos quando considerado o uso de dispositivos de sombreamento, principalmente. Em função disso, equilibrar o acesso à luz natural de qualidade com a baixa demanda de energia para condicionamento de ar mostrou-se um dos principais problemas a serem solucionados nas fachadas altamente envidraçadas.

Assim, o estado atual da arte foi fundamental para o desenvolvimento da base teórica desta pesquisa, permitindo identificar as tipologias de fachadas envidraçadas mais recorrentes e os principais parâmetros que interferem no seu desempenho (Tabela 1 e Tabela 2). Essas informações contribuíram com a formação dos modelos

de diferentes configurações de fachadas envidraçadas, que foram analisados nesse trabalho de investigação.

Observou-se que quando se trata de fachadas de vidro, sobretudo fachadas duplas, são escassos os trabalhos realizados para o contexto climático brasileiro, principalmente na ZB2, demonstrando a importância de estudos que dirijam o olhar ao sul do Brasil, onde as fachadas envidraçadas são muito usadas, especialmente em edificações comerciais. No que tange especificamente às fachadas duplas, verificou-se que a maior parte das análises expostas nos artigos apresentados se concentram nas características da camada externa e na geometria da cavidade, existindo uma lacuna no conhecimento sobre a interferência da camada interna no desempenho dessas tipologias de fachadas.

Em relação aos métodos de análise, a simulação computacional se mostrou como um método confiável e amplamente utilizado, com destaque para o *software EnergyPlus* como ferramenta usual para avaliações termoenergéticas. Quanto às avaliações de luz natural, essas são realizadas em diferentes *softwares*, dependendo do lugar e época da avaliação, por meio de programas específicos para este fim.

Sendo assim, a revisão bibliográfica foi determinante para o desenvolvimento desta pesquisa, norteadora da metodologia adotada e das principais diretrizes que foram seguidas ao longo do trabalho.

3 Método

Para o desenvolvimento do estudo proposto, de avaliação dos desempenhos lumínico e termoenergético de fachadas envidraçadas em edificações comerciais, adotou-se um estudo de caso.

Como método de análise foi definida a simulação computacional dinâmica, realizada por meio dos *softwares Rhinoceros 7* com *plugin ClimateStudio*, para as avaliações de iluminação natural, e *EnergyPlus*, para as termoenergéticas. Uma vez que o *software EnergyPlus* apresenta limitações no que diz respeito às análises de iluminação natural (DIDONÉ; PEREIRA, 2010; RAMOS; GHISI, 2010), programas distintos foram utilizados para as simulações computacionais.

O método desta pesquisa foi dividido em oito etapas, conforme descrito abaixo:

Na Etapa 1, de Revisão Bibliográfica, foram selecionados trabalhos sobre a temática abordada em bases de dados relevantes da área. Para a seleção desses estudos foi realizada uma pesquisa que teve como critérios a escolha de publicações dos últimos dez anos e que contivessem ao menos uma das palavras-chave de busca: “desempenho de fachadas”, “desempenho lumínico”, “desempenho termoenergético”, “desempenho lumínico e termoenergético” e “conforto visual em edifícios de escritórios”.

A Etapa 2 consistiu na definição da Zona Bioclimática Brasileira a ser analisada.

A Etapa 3 tratou da escolha do estudo de caso. A partir desse foi criado um Caso Base como ponto de partida para as avaliações das diferentes tipologias de fachadas envidraçadas.

A Etapa 4 correspondeu à definição dos Casos de Referência, que representaram a adição, supressão ou substituição de alguns componentes da fachada envidraçada do Caso Base. Tais parâmetros estão presentes na arquitetura contemporânea e poderiam potencializar os desempenhos lumínico e termoenergético da edificação.

A Etapa 5 representou a fase de modelagem e configuração computacional para as avaliações lumínica e termoenergética do Caso Base e dos Casos de Referência. A configuração dos modelos foi baseada na INI-C (INMETRO, 2021).

A Etapa 6 abordou as simulações computacionais propriamente ditas. Nesta fase foram avaliadas as variáveis Disponibilidade de luz natural (*Daylight Availability*), e Ofuscamento anual (*Annual Glare*), para as simulações de iluminação natural, e

Intensidade do uso de energia elétrica (*Energy Use Intensity - EUI*), para as simulações termoenergéticas.

A análise de resultados correspondeu à Etapa 7, na qual foram processados e comparados os resultados obtidos pelas simulações computacionais. Nessa etapa buscou-se conhecer quais tipologias de fachadas apresentaram o melhor desempenho lumínico combinado ao menor consumo de energia para climatização artificial, para a ZB2.

Por fim, a Etapa 8 tratou da conclusão desta pesquisa e da elaboração da redação final. Todas essas etapas e seus estágios são apresentadas de forma esquemática na Figura 8.

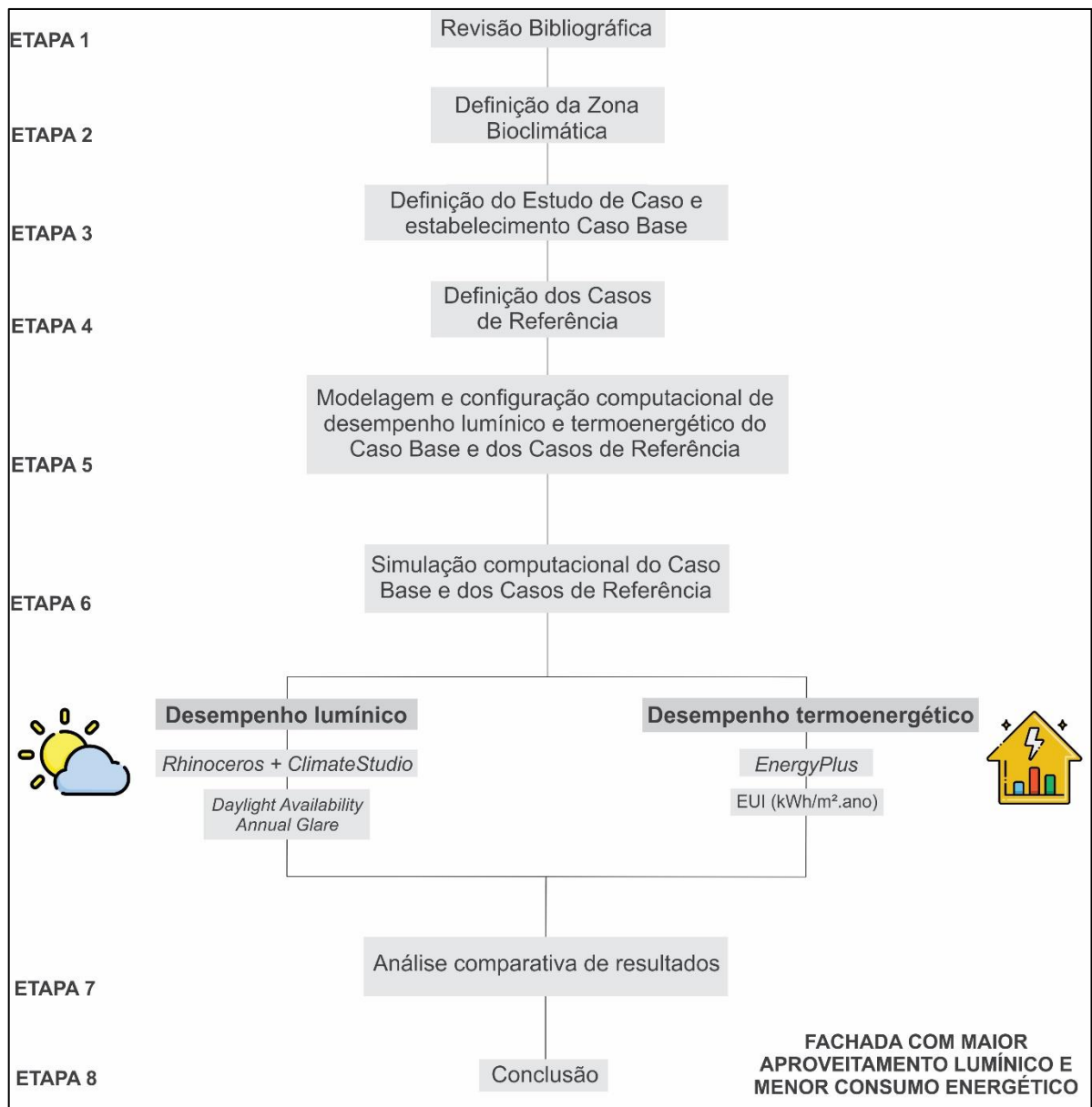


Figura 8 - Fluxograma com indicação das etapas da pesquisa
Fonte: AUTORA, 2021

3.1 Definição da Zona Bioclimática

Para o desenvolvimento desta pesquisa, a Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2), estabelecida conforme zoneamento bioclimático definido pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005) (Figura 9) foi escolhida por apresentar escassez de estudos sobre fachadas envidraçadas e por ser sede da Universidade Federal de Pelotas-RS, local onde foi realizado este estudo.

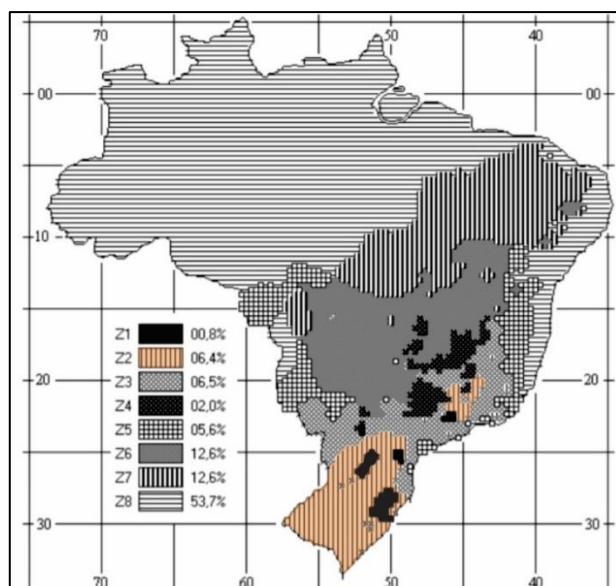


Figura 9 - Mapa com indicação da Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2)
Fonte: Adaptado da NBR 15220-3 (ABNT, 2005)

3.2 Estudo de caso

O objeto do estudo de caso consistiu em um edifício comercial, localizado na região central da cidade de Pelotas-RS, em um terreno de esquina, na Rua XV de Novembro, 653 (Figura 10). De acordo com a classificação climática de Köppen Geiger, essa cidade apresenta clima subtropical úmido (KOTTEK *et al.*, 2006) e encontra-se inserida na ZB2.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma pesquisa exploratória sobre o edifício, por meio de busca e avaliação do projeto arquitetônico, histórico do edifício, visitas ao local para medições *in loco* e levantamento fotográfico, além de entrevista com o engenheiro responsável pela execução da obra, Luís Carlos Bilharva Martins, para a obtenção de maiores informações sobre os materiais e componentes construtivos da edificação.

Projeto do arquiteto Ari Marangon e construído em 1979, o edifício apresenta 11 pavimentos, incluindo um subsolo, estrutura dominó, sendo marcado pela presença

de três volumes sobrepostos: a base, um pavimento com posição intermediária e o corpo.

Dentre os volumes, a base e o corpo da edificação se destacam pela imponência e pela presença de diferentes tipologias construtivas, onde o primeiro é marcado pela horizontalidade e pelos fechamentos opacos de concreto aparente e o segundo por uma fachada envidraçada do tipo semi-cortina (DE MOURA, 2004).

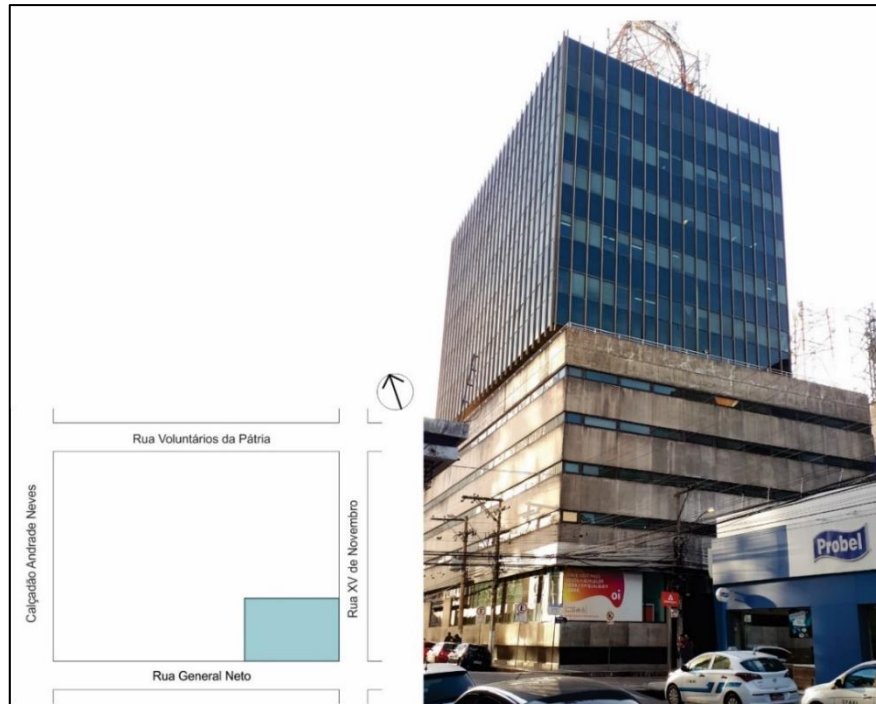


Figura 10 - Planta de situação (à esquerda) e Imagem do Edifício Estudo de Caso (à direita)
Fonte: AUTORA, 2019

A base da edificação – da qual fazem parte um subsolo semienterrado, o térreo e o segundo e terceiro pavimentos – se estende ao longo do terreno e apresenta fechamento de alvenaria com revestimento de painéis de concreto aparente e vidro nas esquadrias. Nela o térreo apresenta grandes panos de vidro absorvente cinza, enquanto o segundo e o terceiro pavimentos concentram a maior parte dos fechamentos opacos e esquadrias dispostas em duas alturas distribuídas em todo o contorno da base voltado para a via pública.

O quarto pavimento, onde tem início a fachada envidraçada, é recuado em relação aos dois volumes principais, com espaço destinado a escritórios e a uma área aberta de terraço. Do quinto ao nono pavimento (bloco 2), a edificação é recuada em relação a base, apresentando fachada semi-cortina, esquadrias de alumínio e um segundo terraço na cobertura (Figura 11).



Figura 11 - Modelo digital do Edifício Estudo de Caso
Fonte: Adaptado de MONTAGNER, 2015

Todos os pavimentos apresentam planta livre em formato retangular e um núcleo onde estão concentrados elevadores, escadas, banheiros e espaços de área técnica, como pode ser observado nas plantas baixas do edifício (Figura 12).



Figura 12 - Plantas baixas do Edifício Estudo de Caso
Fonte: Projeto arq. ARI MARANGON, 1979; Graficação AUTORA, 2019

Por se tratar do foco de interesse deste estudo, esta pesquisa se concentrou na análise do volume envidraçado da edificação. Optou-se por desconsiderar a base

dessa, uma vez que poderia mascarar os resultados da avaliação de desempenho lumínico e termoenergético da fachada de vidro.

O volume envidraçado da edificação possui PAF igual 50%, correspondendo a uma fachada semi-cortina com peitoril interno de alvenaria e esquadria composta por vidro insulado absorvente cinza, com persiana interna acoplada entre eles. Nele, a esquadria, com caixilho de 9cm de espessura, é parte da cortina de vidro, que fica externa ao peitoril, o que contribui para a existência de uma câmara de ar entre o envidraçamento da fachada e a área opaca existente.

A escolha por essa edificação como estudo de caso ocorreu porque, mesmo datada do ano de 1979, apresenta sistema construtivo, materiais e características comumente encontradas nas construções contemporâneas de escritórios, como fachada envidraçada, planta livre, além da evidente qualidade construtiva, que demonstra a preocupação com questões relacionadas ao conforto dos usuários. Isso foi percebido pela presença de dispositivo de sombreamento acoplado aos vidros, forro composto por perfis metálicos rebaixado da laje para passagem de cabos de instalações e lâ de vidro para isolamento térmico e acústico entre os pavimentos.

Pisani e Figueiredo (2011) identificaram que o modelo de planta baixa semelhante ao do estudo de caso, onde o núcleo fica posicionado em uma das faces da edificação, corresponde a um dos modelos mais recorrentes em edifícios de escritórios construídos em São Paulo-SP entre os anos de 1979 e 2010. Brugnera (2018) identificou como características frequentes em edifícios de escritórios brasileiros a planta livre, PAF entre 50% e 80% e presença de fachada envidraçada.

Dessa forma, considerou-se que as características construtivas do objeto deste estudo o tornam um modelo representativo da arquitetura corporativa contemporânea.

3.3 Definição do Caso Base

Para possibilitar comparações entre os desempenhos lumínico e termoenergético de diversas tipologias de fachadas envidraçadas, definiu-se um modelo denominado de Caso Base, similar ao objeto do estudo de caso, porém simplificado, sem a persiana entre os vidros do caixilho interno, conforme pode ser observado na Figura 13.

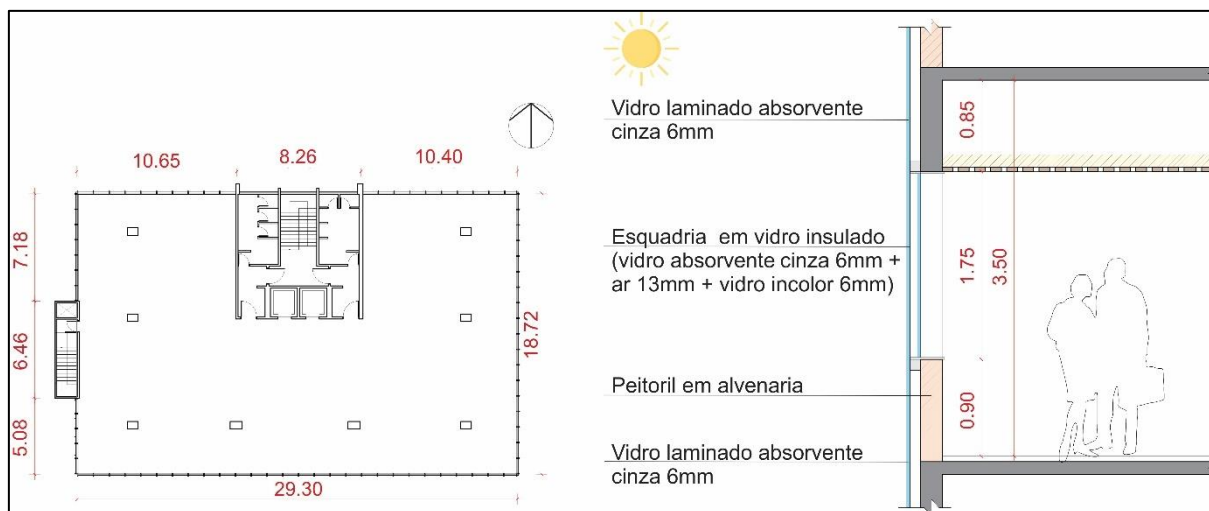


Figura 13 - Planta baixa (à esquerda) e Corte esquemático Caso Base (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

3.4 Definição dos Casos de Referência

A partir da definição do Caso Base, foram estabelecidos os Casos de Referência, modelos que apresentaram novas tipologias de fachadas envidraçadas pela adição, supressão ou substituição de alguns componentes da fachada do Caso Base, utilizadas na arquitetura contemporânea e que poderiam potencializar o desempenho lumínico e termoenergético da edificação.

3.4.1 Caso de Referência 1 (CR-1)

O Caso de Referência 1 (CR-1) propõe a inclusão de um dispositivo de sombreamento do tipo persiana (Figura 14). O edifício adotado como estudo de caso, originalmente apresenta esse sistema acoplado entre os vidros das janelas, no entanto, as persianas foram desconsideradas na caracterização do Caso Base.

A adição de um dispositivo de sombreamento do tipo persiana pode favorecer a qualidade da iluminação e reduzir a carga térmica para resfriamento da edificação, uma vez que é capaz de minimizar a incidência da radiação solar direta. Dessa maneira, por meio do caso CR-1, busca-se avaliar qual o impacto do uso de um dispositivo de sombreamento do tipo persiana na carga térmica e no aproveitamento lumínico da edificação.

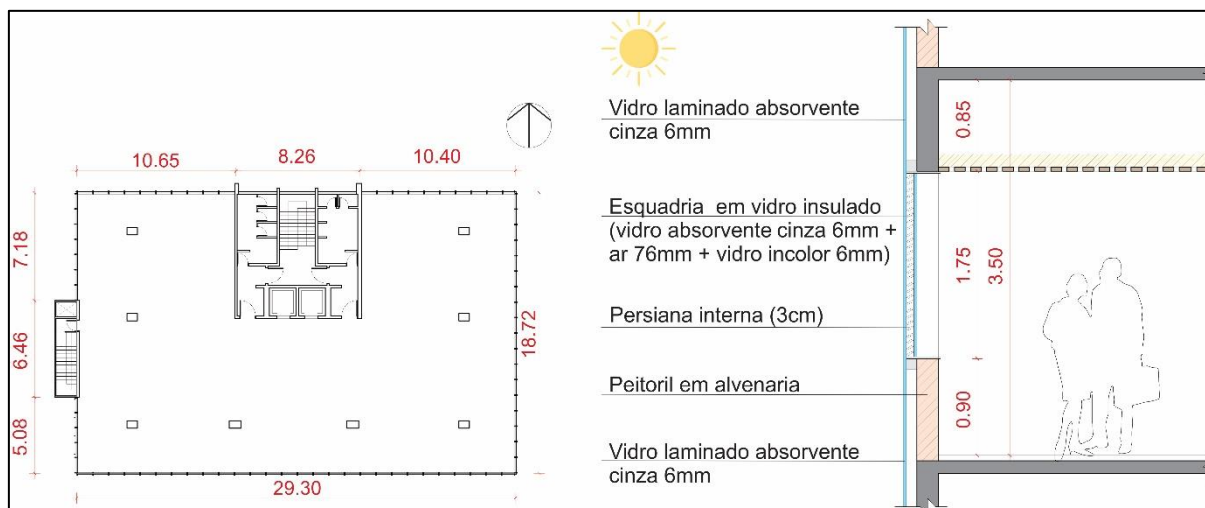


Figura 14 - Planta baixa CR-1 (à esquerda), Corte esquemático CR-1 (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

3.4.2 Caso de Referência 2 (CR-2)

Considerando que entre as vantagens das fachadas envidraçadas estão o maior acesso à luz do dia, a transparência e a integração com o ambiente externo, o CR-2 mantém todas as características do Caso Base, substituindo o vidro absorvente cinza existente por um vidro *low-e* (Figura 15). Essa escolha aconteceu porque o mesmo permite maior acesso à luz natural, com menor transferência de energia por condução, o que reduz as perdas de calor no inverno e os ganhos no verão.

Dessa forma, partindo-se das hipóteses de que uma fachada envidraçada tem maior aproveitamento lumínico e de que o vidro *low-e* é capaz de limitar as trocas térmicas, o CR-2 busca compreender se apenas o uso de um vidro mais eficiente é capaz de equilibrar o acesso à luz do dia com menor consumo energético.

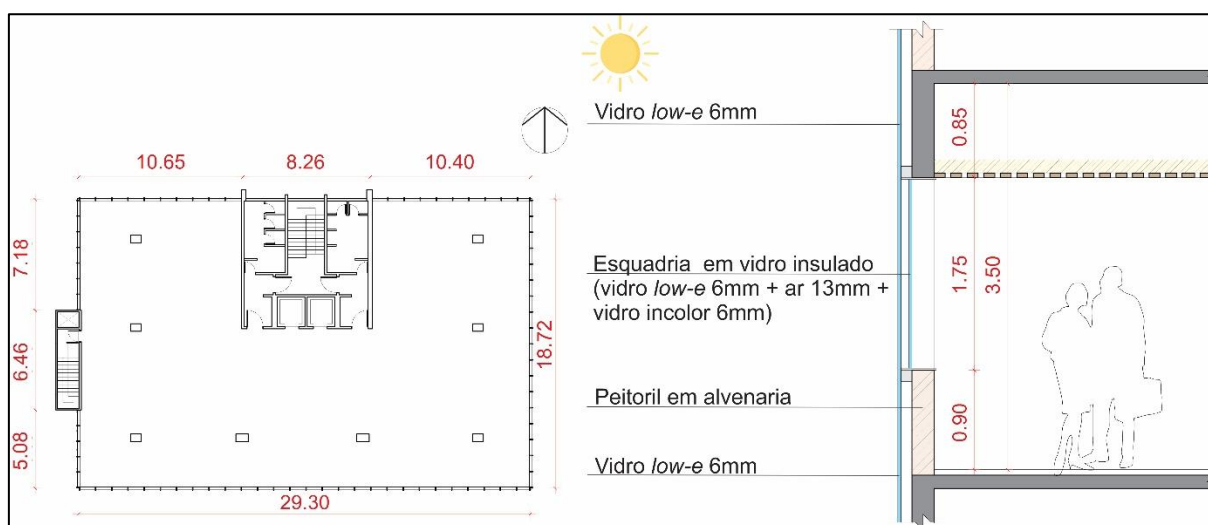


Figura 15 - Planta baixa CR-2 (à esquerda), Corte esquemático CR-2 (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

3.4.3 Casos de Referência CR-3A, CR4A e CR-5A

Nos Casos de Referência CR-3A (Figura 16), CR-4A (Figura 17) e CR-5A (Figura 18), foram propostas fachadas duplas ventiladas naturalmente com geometria da cavidade do tipo multipavimentos. Nestes modelos a camada interna do edifício é composta por uma fachada semi-cortina, com PAF de 50%, em que uma segunda pele de vidro é adicionada à determinada distância da construção, formando uma câmara de ar entre elas e permitindo que o ar flua através dessa cavidade.

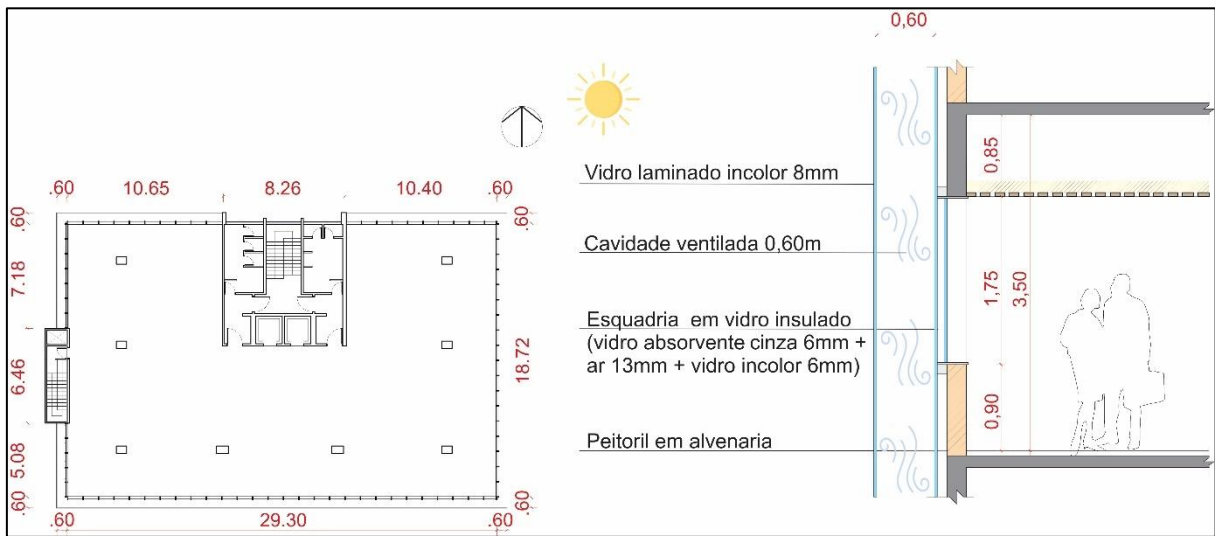


Figura 16 - Planta baixa CR-3A (à esquerda), Corte esquemático CR-3A (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

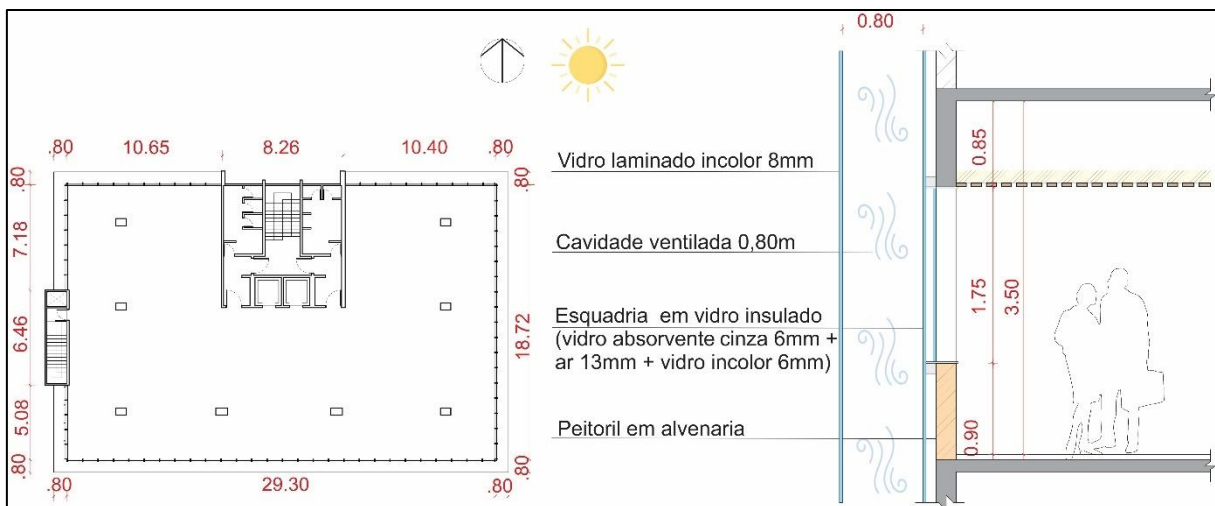


Figura 17 - Planta baixa CR-4A (à esquerda), Corte esquemático CR-4A (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

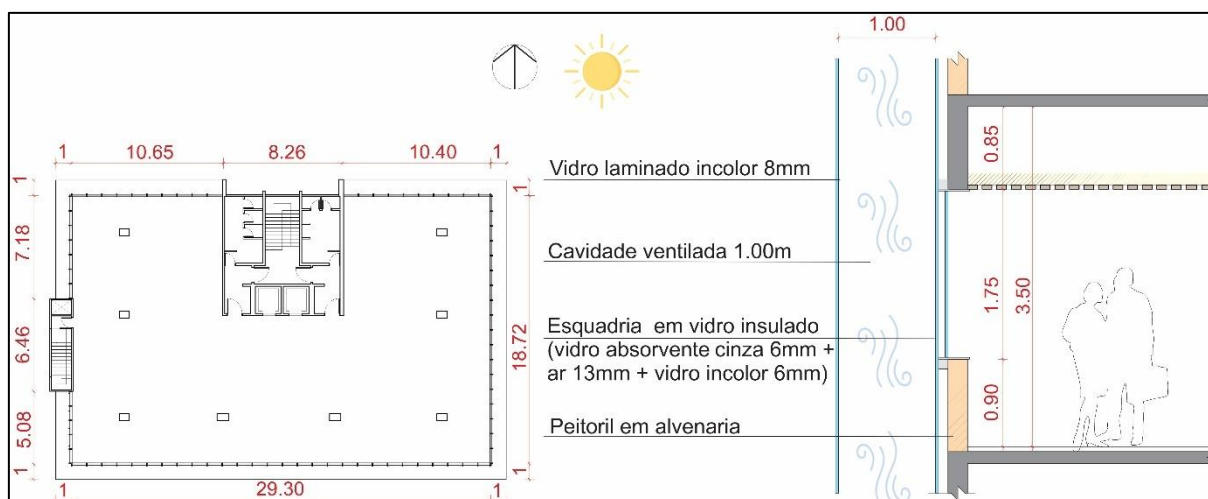


Figura 18 - Planta baixa CR-5A (à esquerda), Corte esquemático CR-5A (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

A escolha por esse modelo construtivo foi motivada por se caracterizar como uma solução relativamente recente, criada para minimizar os custos com refrigeração ou aquecimento da edificação, sendo uma tipologia construtiva que pode auxiliar na redução dos impactos térmicos no interior da edificação.

Parte-se da hipótese de que uma pele extra de vidro separada do edifício por uma câmara de ar pode funcionar como uma barreira, reduzindo o impacto da radiação na carga térmica interna.

Nos Casos de Referência CR-3A, CR-4A e CR-5A, uma pele de vidro laminado incolor foi acrescentada em todas as faces externas do volume envidraçado da edificação. Assim, a camada externa da fachada dupla é composta por um vidro laminado incolor 8mm, afastado da construção por uma câmara de ar de tamanho variável (CR-3A = 0,60m; CR-4A = 0,80m; e CR-5A = 1,00m), enquanto a interna é composta por um vidro insulado absorvente cinza (vidro laminado absorvente cinza 6mm + ar 13mm + vidro laminado incolor 6mm) e revestimento de vidro laminado absorvente cinza de 6mm posicionados em frente aos componentes opacos da fachada (peitoril e viga de borda)

Profundidades de cavidade 0,40m a 1,00m são frequentemente investigadas em diversos estudos (ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA, 2017; GÓES *et al.*, 2020; MAZZAROTTO, 2011; TORRES *et al.*, 2007), dependendo do contexto climático analisado. A partir deles, foram determinadas as profundidades de cavidade analisadas nesta pesquisa, sendo que a menor delas, de 0,60m, se deu em função do mínimo acesso para manutenção desta fachada.

Por favorecer o efeito chaminé, foi adotada uma geometria do tipo multipavimentos, além de estudos comprovarem a melhora no desempenho termoenergético do edifício pela adoção desta geometria (ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA, 2017 2015; GÓES, 2020; TORRES *et al.*, 2007).

3.4.4 Casos de Referência CR-3B, CR4B e CR-5B

Os Casos de Referência CR-3B (Figura 19), CR-4B (Figura 20) e CR-5B (Figura 21) correspondem a fachadas duplas ventiladas naturalmente com geometria do tipo multipavimentos. Estes modelos apresentam configuração semelhante a dos casos CR-3A, CR-4A e CR-5A, no entanto, naqueles com terminação “B”, a camada interna é representada por uma fachada tradicional (fechamento em alvenaria e vidro encaixilhado nas esquadrias) com PAF de 50%, onde uma pele de vidro laminado incolor é adicionada a 0,60m (CR-3B), 0,80m (CR-4B) e 1,00m (CR-5B) da edificação. Nesses modelos o revestimento envidraçado foi eliminado da camada interna.

Para Barbosa e Ip (2014) o uso de fachadas duplas pode ser uma solução na busca por edifícios mais eficientes energeticamente quando a adoção de fachadas envidraçadas é desejada, além de ser uma opção viável em processos de *retrofit* de edifícios com fachada tradicional. Assim, por meio dos modelos em questão, busca-se avaliar a influência da configuração da camada interna da edificação no desempenho lumínico e termoenergético e qual a viabilidade de aplicação em fachadas tradicionais, quando se deseja aliar a estética contemporânea encontrada em fachadas altamente envidraçadas.

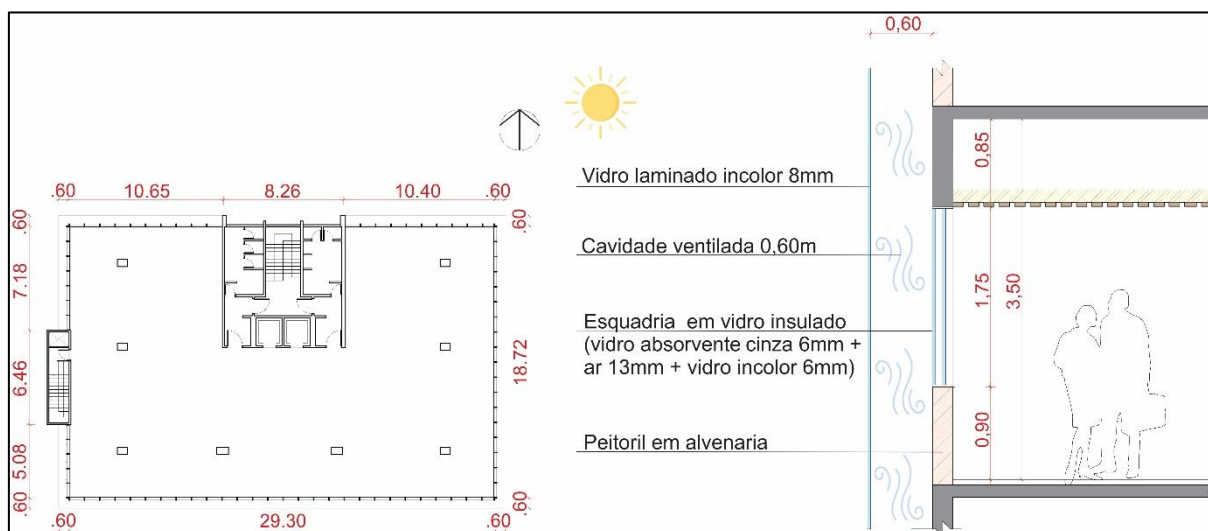


Figura 19 - Planta baixa CR-3B (à esquerda), Corte esquemático CR-3B (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

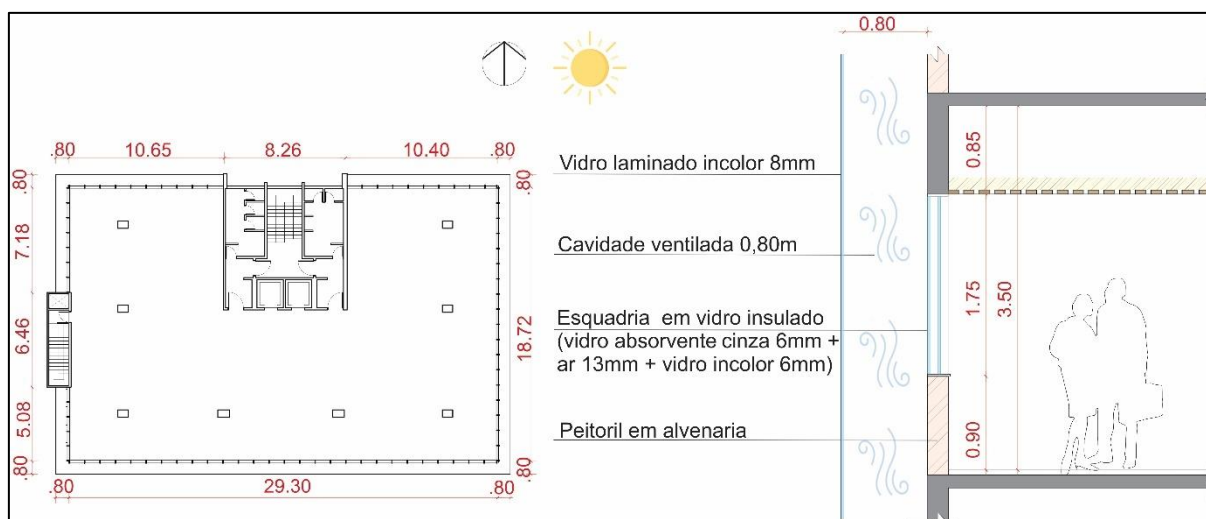


Figura 20 - Planta baixa CR-4B (à esquerda), Corte esquemático CR-4B (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

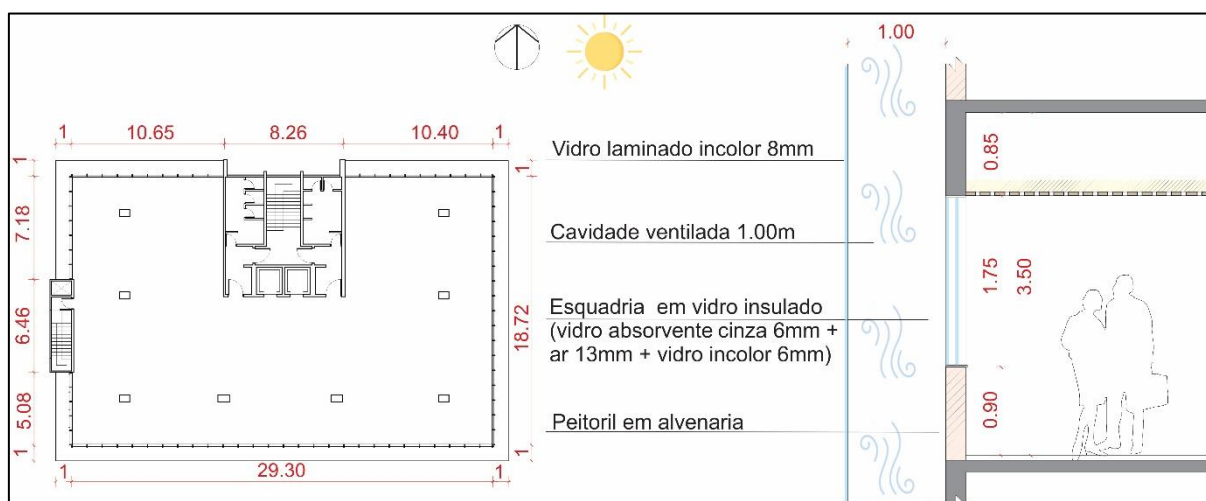


Figura 21 - Planta baixa CR-5B (à esquerda), Corte esquemático CR-5B (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

3.4.5 Caso de Referência 6 (CR-6)

O CR-6 (Figura 22) corresponde a uma fachada cortina em que é proposta a extensão da área de vidro do Caso Base, eliminando seu peitoril. Tal escolha se deu por seu uso recorrente em edificações de escritórios, sendo mais comum atualmente do que propriamente a fachada semi-cortina. Isso permite, nesse caso, um questionamento sobre o impacto da ausência do peitoril interno e do aumento do PAF no desempenho lumínico e termoenergético da edificação.

Neste caso, a altura da abertura passou de 1,75m, do Caso Base, para 2,65m de altura do piso ao forro alterando, assim, o PAF de 50% para 75%. Externamente, o mesmo vidro das aberturas, vidro absorvente cinza, reveste a estrutura do edifício, mantendo o visual totalmente envidraçado.

É consenso na literatura que quanto maior o percentual de envidraçamento de uma fachada, maior a carga térmica para resfriamento da edificação. Todavia, o PAF elevado também favorece o acesso à luz natural, minimizando dessa forma o consumo com iluminação artificial. Desse modo, o intuito dessa análise é o de avaliar o impacto da combinação de ambos os fatores no desempenho do edifício.

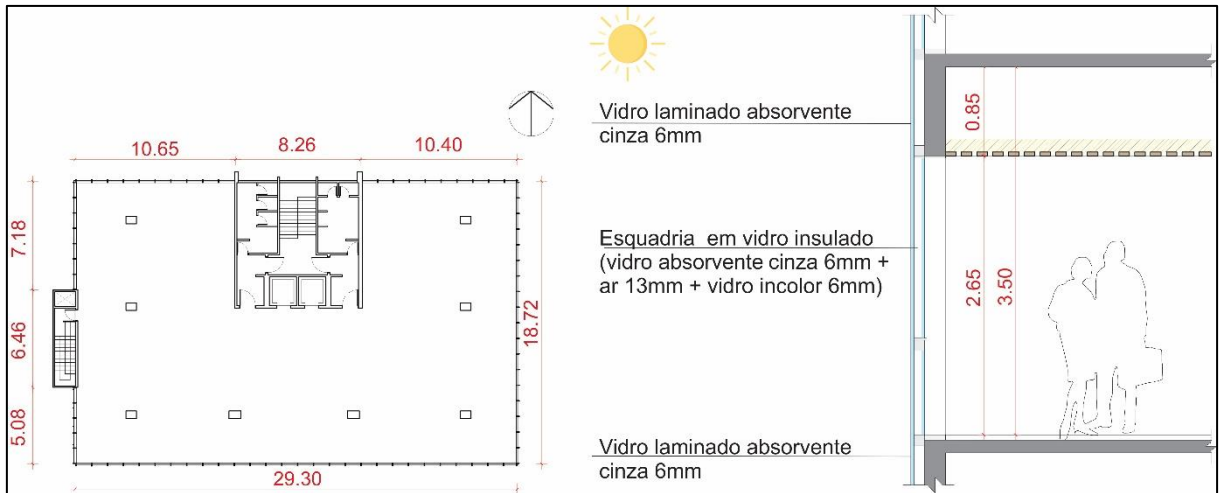


Figura 22 - Planta baixa CR-6 (à esquerda), Corte esquemático CR-6 (à direita)

Fonte: AUTORA, 2021

3.4.6 Casos de Referência CR-7 e CR-8

Nos Casos de Referência CR-7 e CR-8 é proposta uma fachada cortina, PAF de 75%, com o acréscimo de dispositivos de sombreamento do tipo tela perfurada com diferentes percentuais de perfuração, sendo eles: tela perfurada com 25% de perfuração para o CR-7 e tela perfurada com 50% de perfuração para o CR-8 (Figura 23).

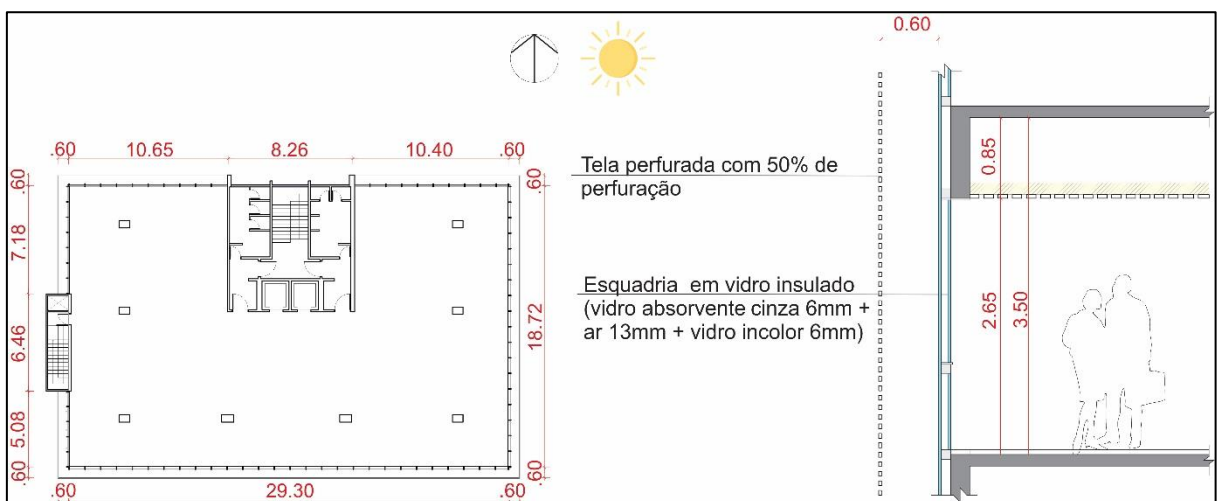


Figura 23 - Planta baixa CR-8 (à esquerda), Corte esquemático CR-8 (à direita)

Fonte: AUTORA, 2021

A tela perfurada foi escolhida por promover a estética contemporânea da fachada, manter a permeabilidade visual promovida pelas fachadas envidraçadas, ao mesmo tempo em que atua como um filtro contra os ganhos solares diretos e o excesso de iluminâncias. Sendo assim, o intuito dessas análises foi o de compreender se a introdução de um dispositivo de sombreamento fixo apresenta benefícios em termos energéticos sem comprometer o acesso e a qualidade da iluminação natural.

Nos Casos de Referência CR-7 e CR-8, a tela perfurada foi posicionada a 0,60m da construção para facilitar a sua manutenção e abertura das esquadrias em todos os lados do volume envidraçado da edificação. Na Figura 24, são exibidas imagens para exemplificar o tipo de tela perfurada utilizada.

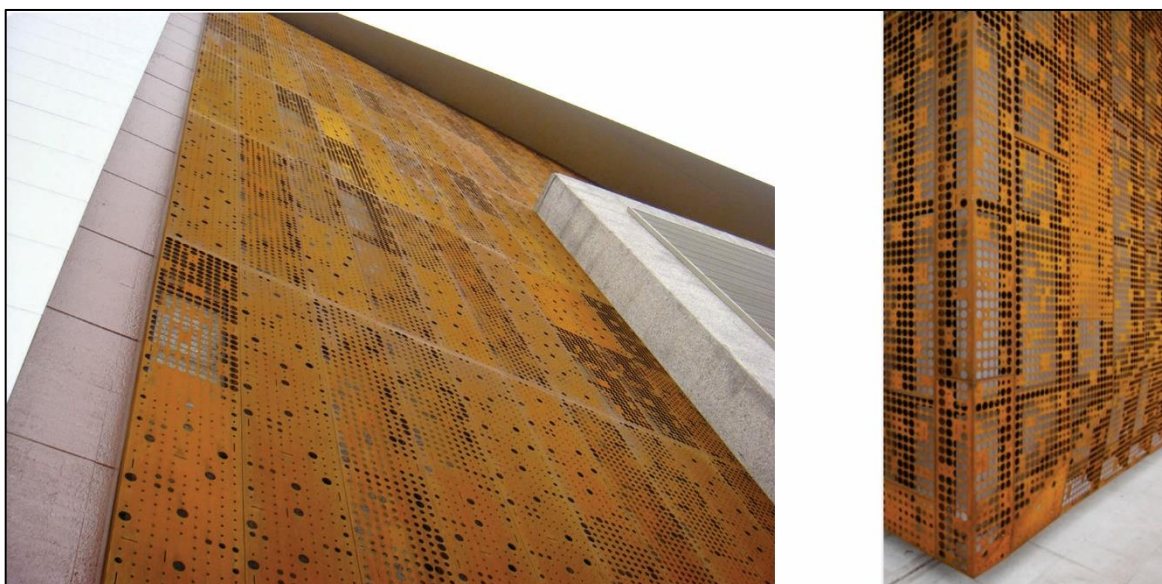


Figura 24 - Imagem ilustrativa da tela perfurada utilizada
Fonte: HUNTER DOUGLAS, 2022

3.4.7 Casos de Referência CR-9, CR-10 e CR-11

Os Casos de Referência CR-9 (Figura 25), CR-10 (Figura 26) e CR-11 (Figura 27) são compostos por fachadas dupla ventilada naturalmente. Nesses modelos, diferentemente dos casos CR-3A, CR-4A e CR-5A, a pele de vidro extra é adicionada a uma fachada cortina com PAF de 75%, ou seja, nessa configuração não existe o peitoril em alvenaria na face interna da construção.

Assim como nos demais casos com fachada dupla, cada um dos modelos analisados teve sua a profundidade de cavidade ventilada variada, sendo elas: 0,60m (CR-9), 0,80m (CR-10) e 1,00m (CR-11). A geometria da cavidade foi do tipo multipavimentos.

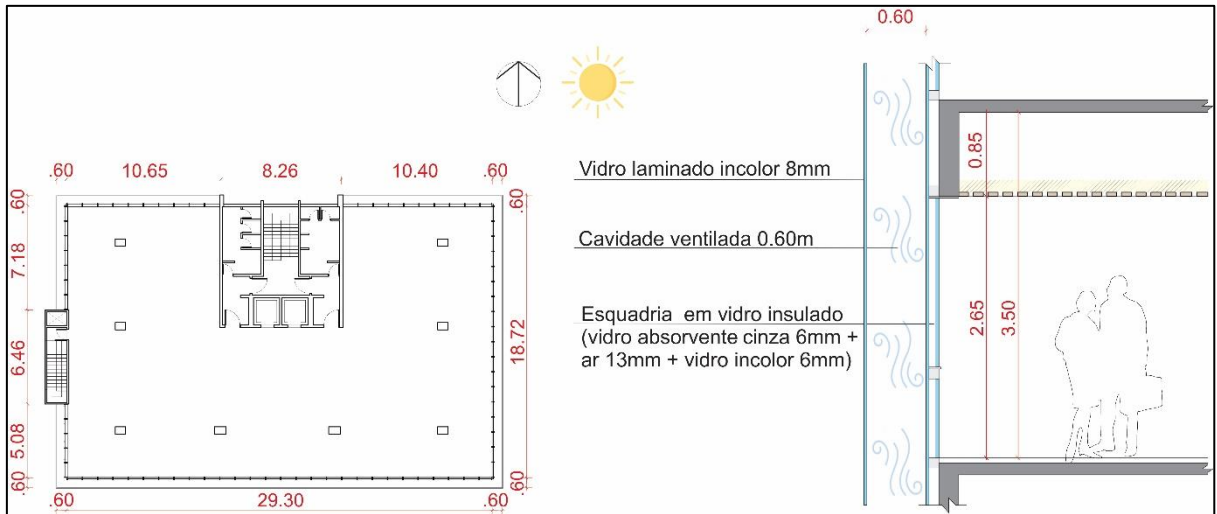


Figura 25 - Planta baixa CR-9 (à esquerda), Corte esquemático CR-9 (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

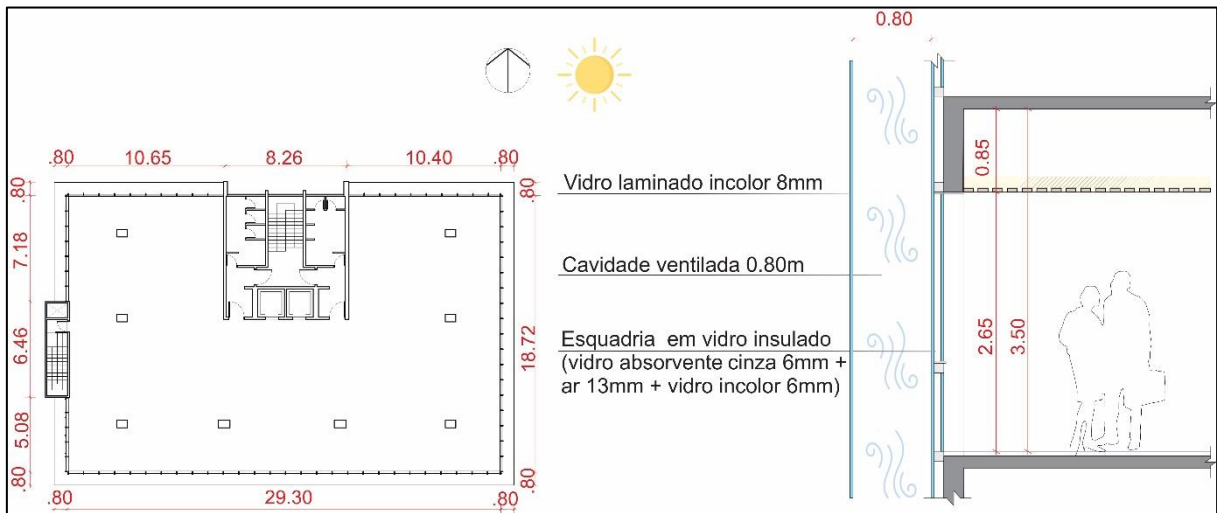


Figura 26 - Planta baixa CR-10 (à esquerda), Corte esquemático CR-10 (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

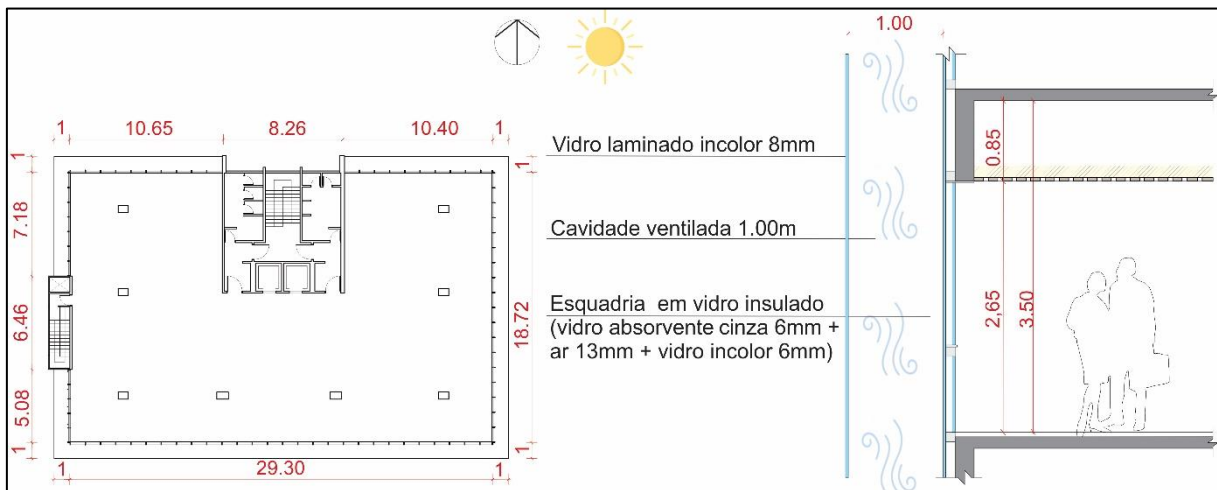


Figura 27 - Planta baixa CR-11 (à esquerda), Corte esquemático CR-11 (à direita)
Fonte: AUTORA, 2021

A camada externa da fachada dupla é composta por um vidro laminado incolor de 8mm afastado da construção por uma câmara de ar de tamanho variável (0,60m, 0,80m e 1,00m), enquanto a camada interna é composta por um vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm + câmara de ar de 13mm + vidro laminado incolor de 6mm).

Por meio desses modelos, busca-se avaliar a interferência de uma segunda camada de vidro e de uma cavidade ventilada no sentido de minimizar os efeitos da radiação solar no interior do edifício, além do impacto do aumento do PAF, agora com 75%, nessa tipologia de fachada.

3.5 Simulações computacionais

O primeiro procedimento para as simulações de desempenho lumínico e termoenergético diz respeito à modelagem do Caso Base e dos Casos de Referência, descrita a seguir:

O edifício estudo de caso apresenta orientação -19°N , assim para tornar as análises mais abrangentes, os modelos foram orientados no eixo leste - oeste, ou seja, com suas maiores faces voltadas para as orientações norte e sul.

Para as simulações computacionais de desempenho termoenergético, o edifício foi modelado no *software SketchUp Make 17* com *plugin Euclid versão 0.9.3*. Foram considerados os seus seis pavimentos com fachadas envidraçadas, uma vez que não é possível avaliar a influência da fachada dupla no desempenho termoenergético do edifício apenas em um pavimento, pois a geometria multipavimentos da cavidade ventilada tem influência na quantidade de radiação solar transmitida para o ambiente interno, assim como a velocidade do fluxo de ar no interior da cavidade, interferindo diretamente nos seus resultados de desempenho térmico (ALBERTO; RAMOS; ALMEIDA, 2017).

Para as simulações computacionais de desempenho lumínico, a modelagem foi realizada no *software SketchUp Pro 21*. Foi selecionado um pavimento tipo, de planta livre e posição intermediária na edificação, considerando apenas a sua área de uso permanente, região pertencente aos espaços de escritórios. Foram observadas as seguintes observações e/ou limitações:

a) as obstruções externas foram desconsideradas de forma a tornar mais abrangente os resultados desta pesquisa. Dessa maneira, o entorno não tem influência no acesso à iluminação natural;

b) compreende-se que a radiação solar pode incidir de forma diferente, dependendo da altura do pavimento. Entretanto, foram realizados testes piloto nos quais se observou que a posição do pavimento teve pouca ou nenhuma influência nos resultados das simulações de desempenho lumínico, quando considerado o entorno livre de obstruções;

c) as análises lumínicas se concentraram no acesso à luz natural e na qualidade da iluminação do ambiente interno livre de móveis e equipamentos.

Dessa forma, a modelagem computacional ocorreu conforme a Figura 28.

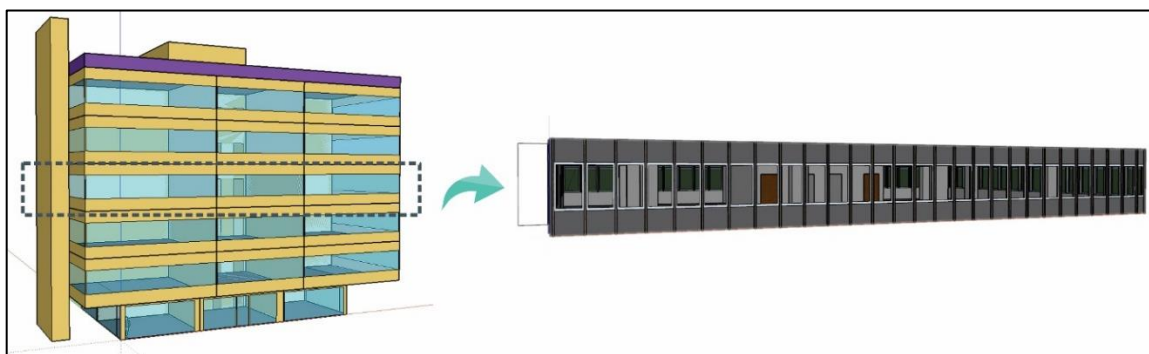


Figura 28 - Modelos tridimensionais do Caso Base modelados no *software SketchUp Make 17* com *plugin Euclid* (imagem à esquerda) e *SketchUp Pro 21* (imagem à direita)

Fonte: AUTORA, 2021

Em ambas as análises, durante a etapa de simulação computacional, foi utilizado o arquivo climático de Santa Maria-RS (Latitude: 29°68'S, Longitude: 53°81' W), cidade que integra a mesma zona bioclimática de Pelotas-RS, conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), e que possui a mesma classificação climática de Köppen Geiger (KOTTEK *et al.*, 2006) de Pelotas. Esse procedimento foi necessário devido a inconsistências identificadas nos arquivos climáticos dessa última cidade.

O arquivo climático utilizado foi elaborado por Maurício Roriz, por meio dos dados horários registrados em 411 estações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre os anos de 2000 e 2010, alcançando um ano de referência para o local em questão (RORIZ, 2012). Este arquivo, que possui formato *.epw*, teve seus dados atualizados em 2018 (LABEEE, 2021), sendo compatível com os *softwares* utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa, *ClimateStudio* e *EnergyPlus*.

3.6 Simulação computacional de desempenho lumínico

Com o intuito de avaliar o impacto das diferentes configurações de fachadas no desempenho da iluminação natural, o Caso Base e os Casos de Referência foram

avaliados por meio de simulação computacional dinâmica, pelo *software Rhinoceros 7* com *plugin ClimateStudio* versão 1.3.7871.19685. Na Figura 29, apresenta-se a planta baixa do ambiente interno utilizado nas análises lumínicas.



Figura 29 - Planta baixa do pavimento tipo
Fonte: AUTORA, 2021

As análises de desempenho lumínico seguiram o método descrito na Figura 30.

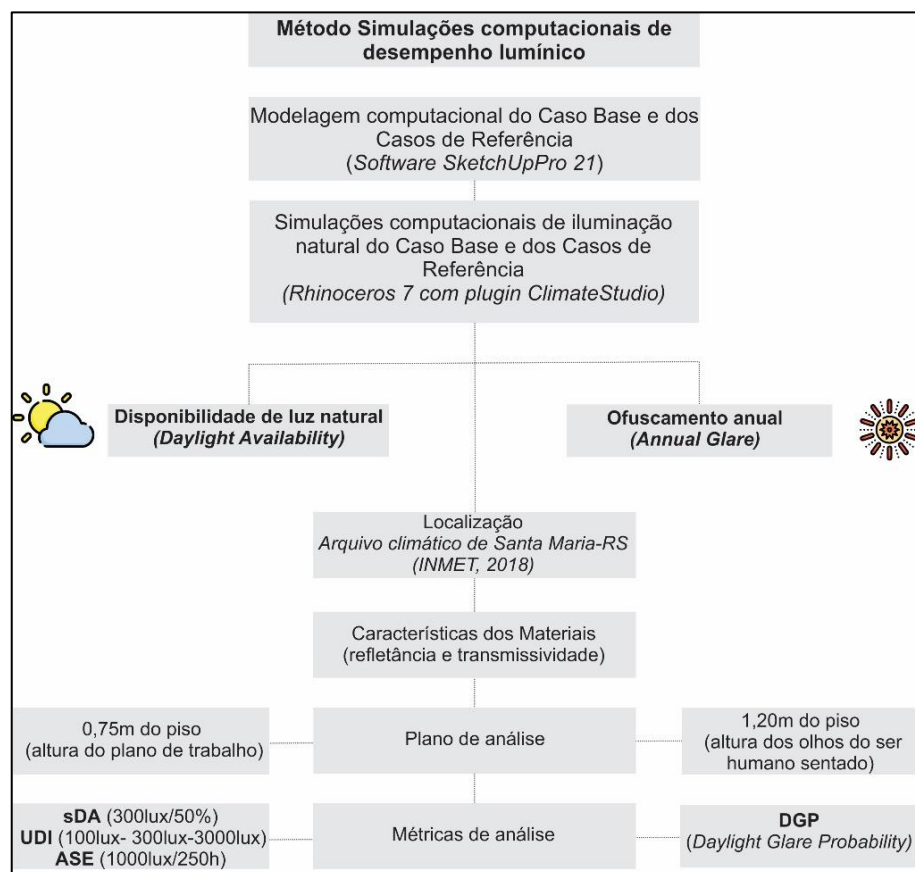


Figura 30 - Fluxograma método simulações computacionais de desempenho lumínico
Fonte: AUTORA, 2021

Nas avaliações de desempenho lumínico do Caso Base e dos Casos de Referência foram analisadas as variáveis: Disponibilidade de luz natural (*Daylight Availability*), que permite predição de luz natural por meio de métricas dinâmicas baseadas em distribuições de iluminâncias internas (SOLEMMA LLC, 2021) e Ofuscamento anual (*Annual Glare*), que determina a probabilidade de ocorrência de brilho excessivo (SOLEMMA LLC, 2021).

Ambas as variáveis são identificadas na barra de ferramentas do *plugin ClimateStudio*, conforme Figura 31.

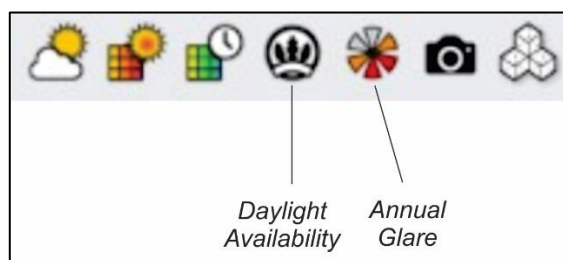


Figura 31 - Identificação das variáveis *Daylight Availability* e *Annual Glare* no *plugin ClimateStudio*
Fonte: SOLEMMA LLC, 2021

A variável *Daylight Availability* permite avaliar a disponibilidade de luz natural por intermédio das métricas de análise *sDA*, *UDI* e *ASE*, enquanto a variável *Annual Glare* realiza as simulações de ofuscamento por meio da métrica *Daylight Glare Probability (DGP)*.

Dessa forma, foram necessárias duas simulações para cada um dos casos analisados, totalizando 24 simulações de iluminação natural. Para a simulação de cada uma das variáveis, foram configurados a localização dos modelos, as características ópticas dos materiais, o plano a ser avaliado e as métricas de análise. A configuração do Caso Base e dos Casos de Referência é apresentada a seguir:

3.6.1 Configuração computacional para simulação de iluminação natural do Caso Base

A Figura 32 representa o modelo tridimensional do pavimento tipo do Caso Base, com fachada semi-cortina. Para as simulações de luz natural, a modelagem computacional foi realizada pela discriminação por camadas (*layers*) no *software SketchUp Pro 21* de cada um dos elementos construtivos e materiais existentes no pavimento tipo da edificação. Esse procedimento é importante, uma vez que as propriedades ópticas de cada material devem ser especificadas posteriormente no *plugin ClimateStudio* para a realização das simulações de luz natural.

Durante a construção do modelo computacional, as paredes podem ser representadas com espessura, enquanto os vidros devem ser modelados como superfícies planas, para posterior identificação da sua constituição no *ClimateStudio*.

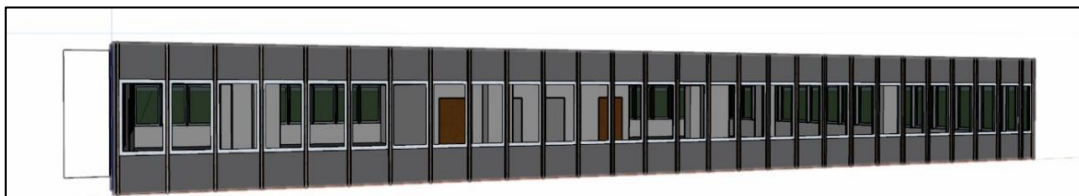


Figura 32 - Modelo tridimensional simulado no software *Rhinoceros* com *plugin ClimateStudio*
Fonte: AUTORA, 2021

3.6.1.1 Configuração computacional para Disponibilidade de luz natural (*Daylight Availability*)

Para a realização das análises de disponibilidade de luz natural foi selecionado o campo *CS Workflows: Daylight Availability*. Esse objeto permite a realização de simulações computacionais dinâmicas de luz natural, a partir da inserção do arquivo climático do estudo.

Dessa forma, o arquivo climático de Santa Maria-RS foi inserido no campo *CS Workflows: Site Analysis* (Figura 33), sendo possível, por meio dele, considerar, durante as avaliações de desempenho lumínico, as condições climáticas e de céu ao longo de todo ano.

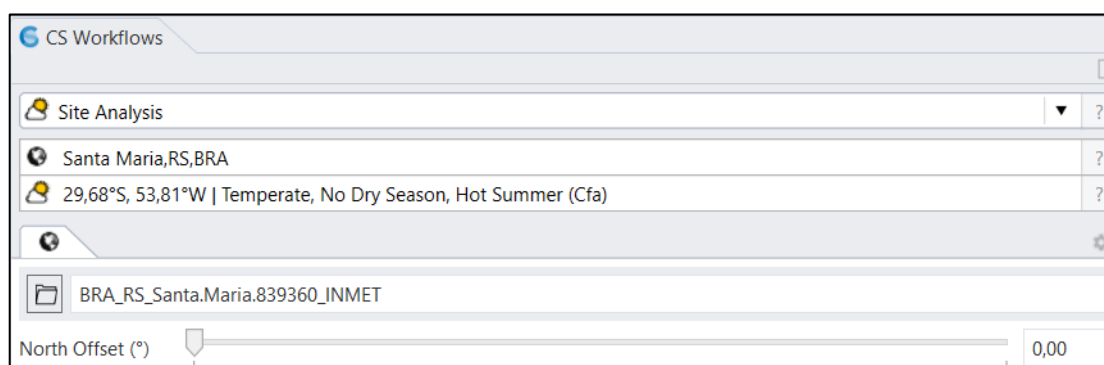


Figura 33 - Localização do modelo simulado no campo *CS Workflows: Site Analysis* do *plugin ClimateStudio*
Fonte: AUTORA, 2021

3.6.1.2 Definição do plano e pontos de análise de luz natural

Para a avaliação dos níveis de iluminação, foram configurados no objeto *CS Occupied Areas* do *plugin ClimateStudio* o número e a posição dos sensores de iluminação natural no ambiente avaliado. Esse campo permite a análise da iluminação em qualquer tipo de superfície, devendo os nós do sensor serem posicionados a uma

distância pré-determinada. Assim, os sensores foram posicionados a uma altura de 0,75m do piso, valor correspondente ao plano de trabalho, e distribuídos em uma malha de 0,50x0,50m, em observância à INI-C (INMETRO, 2021).

3.6.1.3 Configuração dos materiais

As características dos materiais influenciam diretamente as condições de iluminação nos ambientes, sendo um dos fatores responsáveis pelo comportamento do edifício frente à luz solar. Em função disso, todos os materiais com sua devida refletância (materiais opacos) e sua transmitância visível (tvis) (vidros) foram configurados no ícone *CS Materials: Assign Materials* do *plugin ClimateStudio*, conforme Tabela 7.

As características dos materiais existentes no objeto do estudo de caso foram identificadas durante visitas à edificação e permaneceram constantes em todas as simulações de iluminação natural no Caso Base e nos Casos de Referência.

Tabela 7 - Refletância e Transmissividade dos materiais em %

Componentes	Características dos componentes	Refletância (%)
Paredes externas	Pintura cinza escuro	7,82
Paredes internas	Pintura PVA na cor branca	80,7
Piso	Porcelanato cor bege claro	68,3
Portas	Madeira	45,4
Caixilhos e Perfis Janelas	Alumínio	44,2
Forro	Perfis metálicos na cor champagne	41,3
Perfis fachada cortina	Perfis metálicos na cor champagne	41,3
Componentes	Características dos componentes	Transmitância visível (tvis, %)
Vidro esquadrias*	Vidro insulado (vidro absorvente cinza 6mm + câmara de ar 13mm + vidro laminado incolor 6mm)	39,2

Fonte: BIBLIOTECA SOFTWARE CLIMATESTUDIO, 2021; LBNL, 2021*

3.6.1.4 Configuração das métricas de análise

Com o intuito de avaliar o desempenho lumínico da edificação, as seguintes variáveis foram configuradas no campo *CS Workflows: Daylight Availability*, subitem *Metrics* do *ClimateStudio*: i) Autonomia de luz natural espacial (*Spatial Daylight Autonomy* - sDA), correspondente a porcentagem do espaço que apresenta um valor mínimo de iluminância, por um determinado período (IESNA, 2012); ii) a Exposição Solar Direta Anual (*Annual Sunlight Exposure*, ASE), porcentagem de área do

ambiente que excede 1000lux por mais de 250 horas ocupadas ao longo do ano (IESNA, 2012); iii) a Iluminância útil da luz natural (*Useful Daylight Illuminance* - UDI), correspondente ao percentual de horas ocupadas, em que uma faixa de valores de iluminância considerada útil é alcançada no plano de trabalho (MARDALJEVIC, 2015).

Conforme o estabelecido pela INI-C (INMETRO, 2021), que, no item C.II.3, recomenda como procedimento de cálculo para simulações de iluminação natural seguir as orientações da IES LM 83 mais atual (IESNA, 2012), foram adotados como critérios de análise:

a) sDA de 300lux/50%, estabelecido como: i) preferencial em no mínimo 75% da área do ambiente, o que significa iluminância de 300lux em pelo menos 50% do período de ocupação em 75% da área do ambiente; e ii) aceitável, sDA de 300lux/50% em no mínimo 55% da área do ambiente;

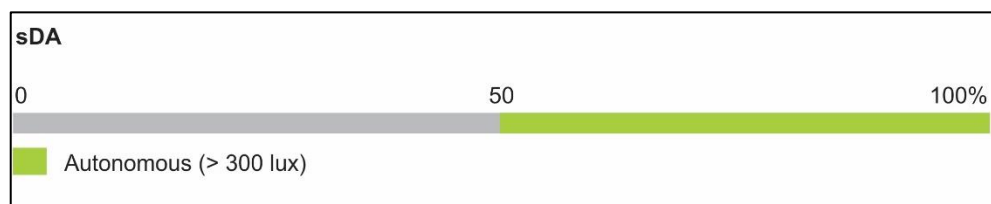


Figura 34 - Critério de análise simulações computacionais de sDA autônoma (300lux/50%)
Fonte: SOLEMMA LLC, 2021

b) ASE 1000lux/250h: Como critério de análise de resultados foram consideradas ASE 1000lux/50% maior de 10% como insatisfatório, menor de 7%, como neutro ou aceitável e menor de 3% como favorável.



Figura 35 - Critério de análise para simulações de ASE (1000/250h)
Fonte: SOLEMMA LLC, 2021.

Com relação à análise de UDI, foram estabelecidas faixas de iluminâncias, correspondentes a: i) 0-100lux, faixa de valores em que a iluminância considerada útil não é atingida; ii) 100-300lux, UDI suplementar, faixa de iluminância em que pode haver necessidade de complementação com luz artificial; iii) UDI autônoma, de 300-3000lux, faixa em que a iluminância considerada útil é atingida somente com luz

natural; iv) e UDI excessiva, superior a 3000lux, em que é provável a ocorrência de ofuscamento (MARDALJEVIC, 2015).

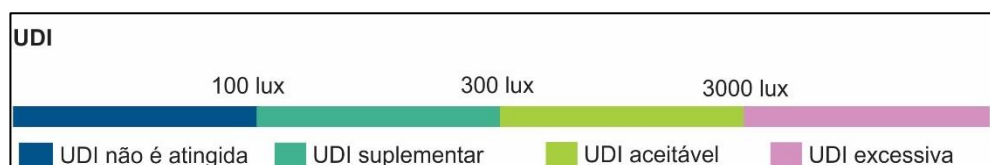


Figura 36 - Faixas de iluminâncias avaliadas nas simulações de UDI
Fonte: SOLEMMA LLC, 2021.

3.6.2 Configuração computacional para análise de Ofuscamento anual (*Annual Glare*) do Caso Base

A variável *Annual Glare* avalia a presença de ofuscamento ao longo do ano. Dessa forma, o *plugin ClimateStudio* calcula a distribuição anual de reflexos em uma área ocupada, por meio da métrica de análise *Daylight Glare Probability* (DPG) (SOLEMMA, 2021). A DGP pode ter valores entre 0% e 100%, que são divididos em ofuscamento imperceptível, perceptível, perturbador ou intolerável, conforme Figura 37.

 Disco solar	Ofuscamento imperceptível	Ofuscamento perceptível	Ofuscamento perturbador	Ofuscamento intolerável
	$DPG \leq 34\%$	$34\% < DPG \leq 38\%$	$38\% < DPG \leq 45\%$	$45\% < DPG$

Figura 37 - Classificação do ofuscamento
Fonte: WIENOLD; CHRISTOFFERSON, 2006

Como a ocorrência do ofuscamento depende da direção e da posição visual do usuário, os sensores de luz natural foram posicionados a uma altura de 1,20m do piso, a mesma dos olhos do ser humano sentado. Sendo assim, no campo *CS Workflows: Annual Glare/CS Occupied Areas*, os sensores foram posicionados em uma malha de 0,50 x 0,50m, afastados 1,20m do piso.

Os sensores de iluminação natural são representados por um disco solar em formato de pizza dividida em oito fatias, para representar o posicionamento de uma pessoa que pode estar voltada a diferentes direções. A cor de cada fatia representa a porcentagem de tempo por ano em que uma pessoa localizada na posição do sensor e orientada na direção da fatia está enfrentando reflexos perturbadores ou intoleráveis, sendo o limite estabelecido em 5% do tempo de ocupação (SOLEMMA LLC, 2021).

3.6.3 Configuração computacional de iluminação natural dos Casos de Referência

Todos os casos de referência apresentaram a mesma configuração do Caso Base quanto à localização, ao plano de análise e ao posicionamento dos sensores de luz natural, assim como propriedades ópticas dos materiais do ambiente interno. Entretanto, diferiram em relação às características de suas fachadas, cujas especificidades são apresentadas a seguir:

3.6.3.1 Caso de Referência CR-1

O CR-1, apresenta, com relação ao Caso Base, o acréscimo de um dispositivo de sombreamento do tipo persiana em suas janelas. Para a configuração da persiana, no campo *CS Workflows: Daylight Availability*, no subitem *add blinds*, é possível selecionar as aberturas e adicionar o modelo de persiana e suas características.

Para isso, foram seguidas as orientações da INI-C (INMETRO, 2021), que estabelece como critério para o fechamento de cortinas e/ou persianas a Exposição Solar Direta Anual (ASE 1000lux/250h), índice também definido pela IES LM-83 (IESNA, 2012).

Assim, foram selecionadas todas as janelas e acrescentados dispositivos de sombreamento automatizados do tipo persiana. Para as avaliações de sDA e UDI, as persianas são controladas por um algoritmo em que o sistema de sombreamento é acionado se mais de 2% de uma área ocupada associada a uma janela for iluminada por mais de 1000lux de luz solar direta. Para as análises de ASE e DGP, as persianas são consideradas abertas, uma vez que estas métricas têm por objetivo avaliar o risco de ofuscamento ocasionado pela penetração solar no ambiente interno.

O modelo de persiana utilizado apresenta 2,9% de permeabilidade e tvis de 4,8%.

3.6.3.2 Caso CR-2

O CR-2 substitui o vidro original insulado absorvente cinza com tvis igual a 39,2%, do Caso Base, por um vidro insulado do tipo *low-e* com tvis igual a 61,6% (Tabela 8). As características do vidro *low-e* foram configuradas no campo *CS Materials: Assign Materials* do plugin *ClimateStudio*.

Tabela 8 - Configuração do caso CR-2

Componentes	Características dos componentes	Transmitância visível (tvis, %)
Vidro esquadrias	Vidro insulado <i>low-e</i> (vidro <i>low-e</i> 6mm + câmara de ar 13mm + vidro laminado incolor 6mm)	61,6

Fonte: LBNL, 2021*

3.6.3.3 Casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B

Os Casos de Referência CR-3A/B, CR-4 A/B e CR-5A/B apresentam fachada dupla ventilada. Para modelagem e configuração desses modelos, foi adicionada uma camada extra de vidro separada do edifício base por uma câmara de ar ventilada naturalmente com profundidades de 60cm (CR-3 A/B), 80 cm (CR-4 A/B) e 1,00m (CR-5). Os modelos com final A e B apresentaram a mesma modelagem, uma vez que o revestimento de vidro posicionado em frente aos elementos opacos da camada interna da fachada dupla não tem influência nos resultados das simulações de luz natural. A Figura 38 representa o modelo tridimensional do CR-3A/B.

A camada de vidro externa é composta por um vidro laminado incolor de 8mm, com tvis igual a 88,3%, enquanto o vidro interno, das esquadrias, permaneceu o mesmo do Caso Base, com vidro insulado absorvente cinza e tvis de 39,2% (Tabela 9).



Figura 38 - Modelo tridimensional CR-3

Fonte: AUTORA, 2021

Tabela 9 - Configuração dos materiais dos Casos de Referência CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B

Componentes	Características dos componentes	Transmitância visível (%)
Vidro esquadrias	Vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm + câmara de ar 13mm+ vidro laminado incolor 6mm)	39,2
Vidro externo (fachada ventilada)	Vidro laminado incolor 8mm	88,3

Fonte: LBNL, 2021

3.6.3.4 CR-6

Para a modelagem do caso CR-6, com a fachada cortina, o peitoril em alvenaria existente no Caso Base foi eliminado, aumentando-se, assim, a área de vidro dessa fachada. Dessa forma, as aberturas passaram a apresentar altura igual a 2,65m e o PAF de 75%. O modelo tridimensional, apresentado na Figura 39, foi configurado com vidro absorvente cinza com t_{vis} de 39,2%.



Figura 39 - Modelo tridimensional CR-6
Fonte: AUTORA, 2021

3.6.3.5 Casos de Referência CR-7 e CR-8

Os Casos de Referência CR-7 e CR-8 apresentam fachada cortina, com PAF de 75%, com adição de dispositivos de sombreamento fixos do tipo tela perfurada. Para modelagem do sombreamento, a tela perfurada foi considerada de forma simplificada, pela modelagem de barras horizontais com pintura branca e refletância de 80,7%, considerando diferentes percentuais de abertura – 25% para o CR-7 e 50% para o CR-8 – para representar as perfurações da tela (Figura 40).

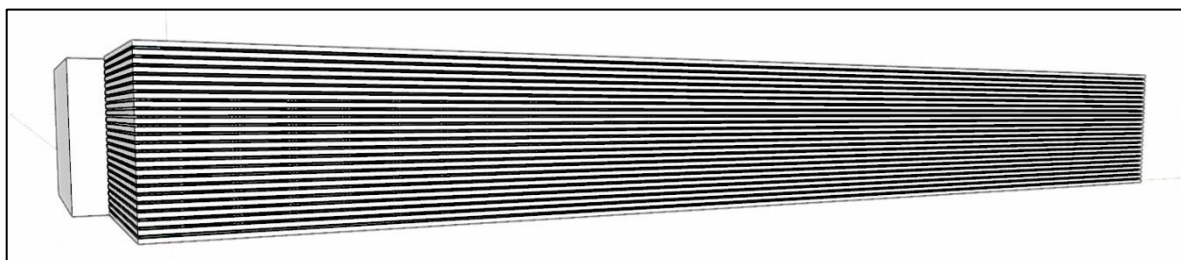


Figura 40 - Modelo tridimensional CR-8
Fonte: AUTORA, 2021

As propriedades ópticas da tela perfurada e dos vidros foram configuradas no campo *CS Materials: Assign Materials*, de acordo com a Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades ópticas dos materiais CR-7 e CR-8

Componente	Características dos componentes	Refletância (%)
Tela perfurada	Pintura na cor branca	80,7
Componentes	Características dos componentes	Transmitância visível (%)

Vidro esquadrias	Vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm + câmara de ar 13mm+ vidro laminado incolor 6mm)	39,2*
------------------	--	-------

Fonte: BIBLIOTECA CLIMATESTUDIO, 2021; LBNL, 2021*

3.6.3.6 Casos de Referência CR-9, CR-10 e CR-11

Os casos de referência CR-9, CR-10 e CR-11 apresentam fachada dupla ventilada. Para sua modelagem, uma pele de vidro extra foi adicionada a um modelo de edifício com fachada cortina com PAF igual a 75%. Assim, uma camada externa de vidro incolor 8mm foi posicionada afastada da edificação, formando uma câmara de ar com profundidades distintas, sendo elas: 0,60m para o CR-9, 0,80m para o CR-10 e 1,00m para o CR-11 (Figura 41).



Figura 41 - Modelo tridimensional CR-9

Fonte: AUTORA, 2021

As propriedades ópticas desses modelos construtivos, configuradas no objeto *CS Materials: Assign Materials*, são apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11 - Propriedades ópticas dos materiais CR-9, CR-10 e CR-11

Componentes	Características dos componentes	Transmissividade (%)
Vidro esquadrias	Vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm + câmara de ar 13mm+ vidro laminado incolor 6mm)	39,2
Vidro externo (fachada ventilada)	Vidro laminado incolor 8mm	88,3*

Fonte: BIBLIOTECA CLIMATESTUDIO, 2021; LBNL, 2021*

3.7 Simulação computacional de desempenho termoenergético

3.7.1 Modelagem e configuração computacional do Caso Base

Para as avaliações de desempenho termoenergético, o Caso Base foi modelado no software *SketchUp Make 17* com *plugin Euclid* versão 0.9.3 e simulado no software *EnergyPlus* versão 8.7.0. O modelo tridimensional é apresentado na Figura 42. Para a definição da localização do modelo, foi inserido o arquivo climático

INMET de Santa Maria-RS (LABEEE, 2018). Neste arquivo, a frequência de ocorrência de dias extremos é de 99,6% para inverno e 4% para o verão, sendo os dias 21 de julho e 21 de novembro utilizados como típicos.

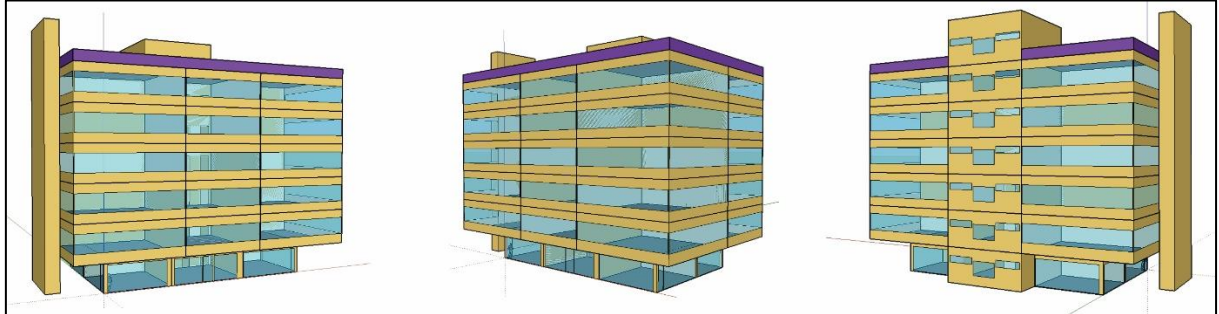


Figura 42 - Modelo tridimensional do Caso Base, modelado no *software SketchUp Make 17*
Fonte: AUTORA, 2021

A modelagem do edifício e a definição das zonas térmicas começaram a partir do quarto pavimento do edifício estudo de caso, onde tem início a fachada envidraçada. Sendo assim, o edifício foi dividido em 38 zonas térmicas, separadas em zonas de uso transitório, representadas pelas circulações verticais, áreas técnicas e banheiros, e zonas de uso permanente, destinada a escritórios.

O quarto pavimento da edificação foi dividido em cinco zonas de uso permanente e uma de uso transitório, com pé-direito livre de 3,50m. Na Figura 43 e na Figura 44, são apresentadas imagens do pavimento e a planta baixa com indicação das zonas térmicas e suas dimensões, respectivamente. Esse pavimento é recuado em relação aos demais analisados, em função disso, por não estar em contato com o solo, o piso foi considerado adiabático durante as simulações computacionais.

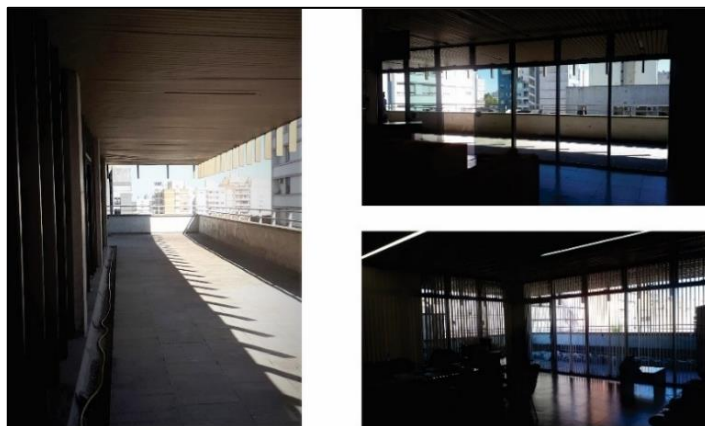


Figura 43 - Vistas do quarto pavimento
Fonte: AUTORA, 2019



Figura 44 - Planta baixa do quarto pavimento com indicação das zonas térmicas
Fonte: AUTORA, 2020

Para a modelagem dos cinco pavimentos tipo, os mesmos foram divididos, em cada andar, em seis zonas térmicas, sendo elas cinco zonas de uso permanente e uma de uso transitório. Todas as zonas apresentam pé-direito livre de 3,50m. A saída de emergência do edifício, posicionada na fachada oeste, foi representada por uma zona térmica com 24,5m de altura, sendo considerada uma zona de uso transitório.

As imagens internas do pavimento tipo e a indicação do posicionamento das zonas térmicas e suas dimensões são apresentadas na Figura 45 e na Figura 46.

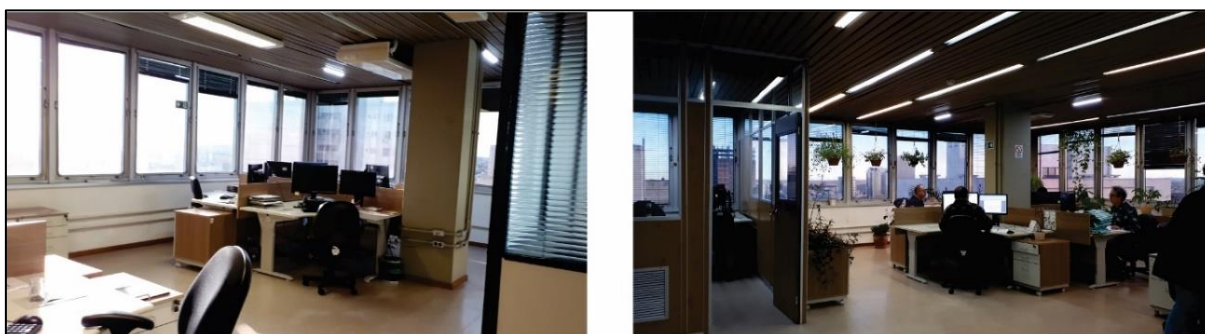


Figura 45 - Imagens internas do Bloco 2
Fonte: AUTORA, 2019

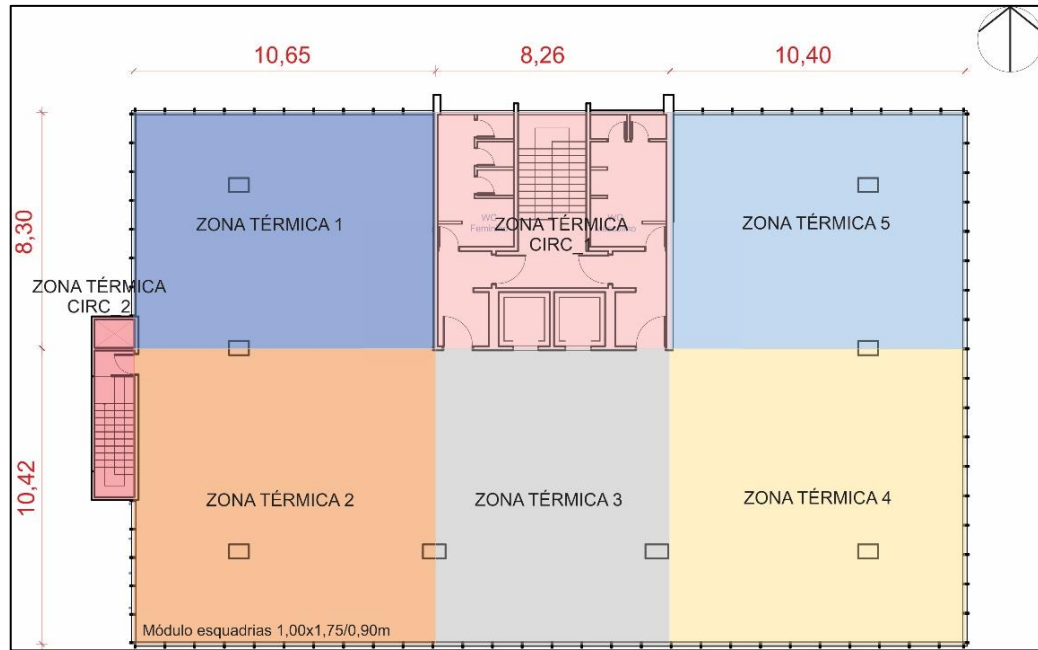


Figura 46 - Planta baixa do pavimento tipo (bloco 2) com indicação das zonas térmicas
Fonte: AUTORA, 2020

3.7.2 Configuração do envelope construtivo

As características construtivas do edifício são apresentadas na Tabela 12. Durante a modelagem do edifício, as superfícies foram consideradas planas para posterior configuração dos elementos construtivos com suas devidas propriedades térmicas.

Tabela 12 - Componentes construtivos do Edifício Caso Base

Parâmetros construtivos do edifício	
Estrutura	Concreto armado. Laje de 10cm de espessura
Paredes externas	Vidro laminado 6mm + alvenaria de tijolo comum (9cm) + reboco (2,5cm) em ambos os lados
Cobertura	Laje impermeabilizada e telha de fibrocimento
Forro	Perfis de alumínio para passagem de instalações + preenchimento de lã de vidro
Piso	Piso cerâmico
Janelas	Esquadria de 9cm de caixilho composta por vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza + câmara de ar de 13mm + vidro laminado incolor 6mm). Altura da esquadria = 1,75m
Portas internas	Compensado de madeira

Fonte: Levantamentos *in loco*, análise do projeto arquitetônico e estrutural do edifício, entrevista LUÍS CARLOS BILHARVA MARTINS, engenheiro responsável pela execução da obra, 2019

A configuração dos componentes construtivos da edificação e suas propriedades térmicas são apresentadas a seguir:

3.7.2.1 Configuração das paredes externas

O Caso Base é constituído por uma fachada semi-cortina, composta por uma parte envidraçada e por um peitoril em alvenaria. Dessa maneira, as paredes externas foram configuradas com tijolo furado de 9x14x19cm à cutelo, com reboco de 2,5cm de espessura de ambos os lados, camada de ar referente ao espaço necessário para fixação dos perfis que fazem a sustentação da pele de vidro da fachada e vidro laminado de 6mm.

Como o *software EnergyPlus* não reconhece materiais compostos por camadas heterogêneas, foi necessário realizar cálculos para a definição das características e propriedades térmicas da parede equivalente, composta por camadas homogêneas, a fim de se adequar a edificação à simulação computacional (Apêndice A). As duas paredes, representadas na Figura 47, possuem a mesma resistência térmica (adequação pela espessura da camada cerâmica), como também a mesma capacidade térmica (adequação por intermédio da densidade de massa aparente da parede equivalente).

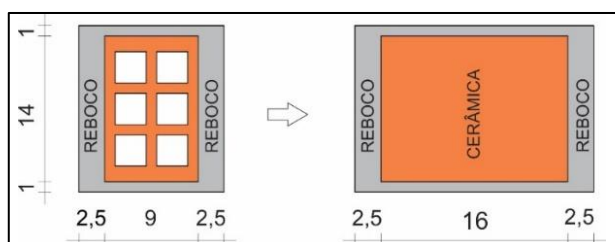


Figura 47 - Camadas simplificadas das paredes externas utilizadas na simulação (dimensões em cm)
Fonte: AUTORA, 2021

Na Tabela 13, é apresentada a composição das paredes externas e as propriedades térmicas dos materiais utilizados para a sua configuração, tais como espessura (**e**), condutividade térmica (**λ**), densidade de massa aparente (**p**), calor específico (**c**), resistência térmica (**R**), capacidade térmica (**CT**) e transmitância térmica (**U**).

Tabela 13 - Composição das paredes externas

Composição das paredes externas	e (m)	λ (W/mK)	p (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	CT (KJ/m ² .k)	U [W/(m ² k)]
Reboco externo	0,025	1,15	2000	1000			
Cerâmica equivalente (nota 1)	0,16	0,9	784,65	920	0,39	215,5	2,56
Reboco interno	0,025	1,15	2000	1000			

Nota 1: Cálculo da cerâmica equivalente realizado conforme NBR 15220 (ABNT, 2005) – Apêndice A

Fonte: Adaptada da NBR 15220 - Parte 2 - Anexo B tabelas B.2 e B.3 (ABNT, 2005)

Com o intuito de considerar o efeito estufa ocasionado pela presença de uma camada de ar entre a superfície transparente e a opaca (peitoril de alvenaria e viga de borda), foi configurado, no campo *Surface Control: Movable Insulation*, um elemento chamado de revestimento de vidro, operado por uma agenda de funcionamento, cujos parâmetros são apresentados na Tabela 14.

Esse elemento, que pode ser colocado tanto na frente de superfícies internas quanto externas, apresenta as mesmas configurações do vidro existente nas janelas (absorvente cinza 6mm), porém com a sua condutividade térmica alterada para que possa representar a resistência térmica presente na câmara de ar, além dos fenômenos das trocas de calor existentes na mesma, sendo caracterizado como um elemento de isolamento, neste caso, transparente à radiação solar.

De acordo com Brugnera (2018), uma vez configurado como um elemento transparente, é possível representar através dele o efeito estufa criado entre as superfícies de vidro e a opaca que está por trás (parede, pilar ou viga). O cálculo da condutividade térmica é apresentado no Apêndice B.

Tabela 14 - Configuração do objeto *Surface Control: Movable Insulation*

Parâmetros	Variáveis
Tipo de isolamento	Externo
Nome da superfície	Nome faces das paredes
Nome do material	Revestimento de vidro (vidro laminado absorvente cinza com a condutividade alterada, 0,503W/m ² .k)
Agenda de funcionamento	Sempre funcionando (<i>Always on</i>)

Fonte: Adaptado de BRUGNERA, 2018

As propriedades óticas do vidro utilizado como revestimento externo, assim como dos demais presentes nas esquadrias, são apresentados na Tabela 15 e foram configurados no campo *Window Material: Glazing* no software *EnergyPlus*. Todas as esquadrias das janelas do Caso Base são de alumínio do tipo *maxim-ar*, sendo compostas por vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm + câmara de ar de 13mm + vidro laminado incolor 6mm). O fechamento da fachada semi-cortina realizado pelo chamado revestimento de vidro, corresponde ao mesmo vidro laminado absorvente cinza de 6mm presente na esquadria, porém com a condutividade térmica de 0,503W/m².k.

Tabela 15 - Propriedades ópticas dos vidros utilizados na simulação computacional do Caso Base

Propriedades ópticas dos vidros	V1	V2	V3
Espessura (mm)	0,006	0,006	0,006
Transmitância a radiação solar (incidência normal)	0,493	0,493	0,769
Refletância a radiação solar na face 1 (incidência normal)	0,06	0,06	0,074
Refletância a radiação solar na face 2 (incidência normal)	0,063	0,063	0,073
Transmitância a radiação solar no espectro visível (incidência normal)	0,437	0,437	0,892
Refletância a radiação visível na face 1 (incidência normal)	0,058	0,058	0,084
Refletância a radiação visível na face 2 (incidência normal)	0,062	0,062	0,083
Transmitância em ondas longas (incidência normal)	0	0	0
Emissividade em ondas longas na face 1 (incidência normal)	0,84	0,84	0,84
Emissividade em ondas longas na face 2 (incidência normal)	0,84	0,84	0,84
Condutividade (W/m ² .k)	0,68	0,503	0,68
V1 - vidro absorvente cinza 6mm Ref: 2150, <i>software</i> Window 7.7			
V2 - vidro absorvente cinza 6mm Ref. 2150 com a condutividade alterada			
V3 - vidro laminado incolor 6mm Ref. 3068, <i>software</i> Window 7.7			

Fonte: LBNL, 2021

As janelas do Caso Base apresentam vidro com *SHGC* igual a 0,564 e Fator de transmitância (*U*) de 2,732W/m².k, de acordo com a Tabela 16.

Tabela 16 - Propriedades térmicas das esquadrias do Caso Base (CB)

Caso Base	Composição Esquadria (<i>Construction</i>)	SHGC	U (W/m ² .K)
CB	Vidro laminado absorvente cinza 6mm	0,564	2,732
	Câmara de ar de 13mm		
	Vidro laminado incolor 6mm		

Fonte: AUTORA, 2021

No que diz respeito às paredes internas, a construção apresenta planta livre, podendo, na realidade, ter diferentes configurações de divisórias internas em cada pavimento tipo. Dessa forma, essa configuração foi realizada considerando-se apenas a resistência do ar, por meio do campo *Surface Construction Elements: Material: No Mass*, conforme descrito na Tabela 17.

Tabela 17 - Propriedades das paredes internas

Propriedades paredes internas	Variáveis
Rugosidade	Liso
Resistência térmica (m ² .k/W)	0,18
Absortância térmica	0,75
Absortância solar	0,75
Absortância visível	0,52

Fonte: BRUGNERA, 2018

Em relação às portas internas, essas são de compensado de madeira e foram configuradas conforme a Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades térmicas das esquadrias internas

Portas internas	e (m)	λ (W/mK)	p (kg/m ³)	c (kJ/kgK)
Compensado de madeira	0,005	0,12	300	1340
Ar	Ver nota 2			
Compensado de madeira	0,005	0,12	300	1340

Nota 2: Resistência térmica do ar (R_{ar}) com direção do fluxo de calor horizontal = 0,16

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005).

3.7.2.2 Configuração do entepiso e da cobertura

O entepiso é composto por uma laje de concreto de 10cm de espessura e revestimento de piso cerâmico, conforme os dados da Tabela 19:

Tabela 19 - Configuração do entepiso

Composição do piso	e (m)	λ (W/mK)	p (kg/m ³)	c (kJ/kgK)	R (m ² /WK)	U [W/(m ² k)]
Piso cerâmico	0,012	0,9	1600	920		
Argamassa de assentamento	0,01	1,15	2000	1000	0,241	4,146
Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005)

Já a cobertura da edificação apresenta dois tipos de fechamentos, sendo composta, em parte, por uma cobertura de telha de fibrocimento, e em parte, por um terraço, conforme apresentado na Figura 48.

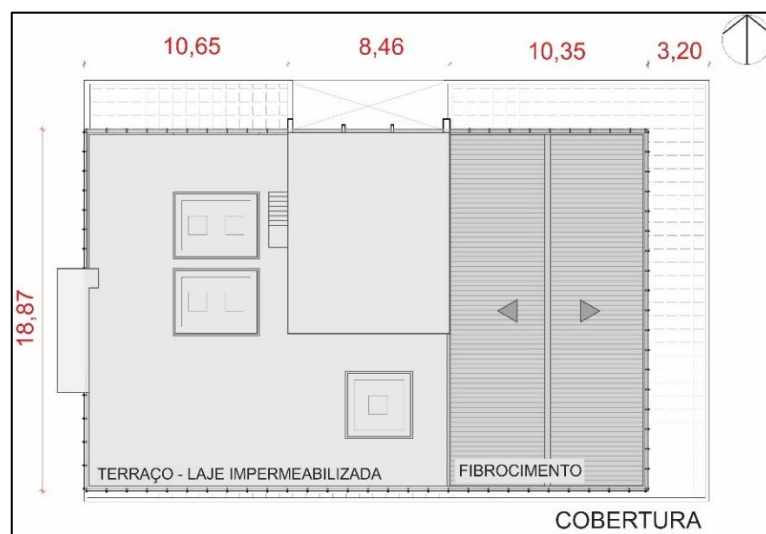


Figura 48 - Planta de cobertura

Fonte: Projeto Arq. ARI MARANGON, 1979; Graficação, AUTORA, 2020

A configuração dos diferentes tipos de coberturas é apresentada na Tabela 20.

Tabela 20 - Composições da cobertura

Cobertura						
Composição 1 - Telhado	e (m)	λ (W/mK)	p (kg/m³)	c (kJ/kgK)	R (m²/WK)	U [W/(m²k)]
Telha de fibrocimento	0,007	0,95	1900	840		
Câmara de ar	0,21	-	-	-		
Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000	2,652	0,377
Reboco	0,025	1,15	2000	1000		
Lã de vidro	0,1	0,045	50	700		
Forro (perfis alumínio)	0,015	230	2700	880		
Composição 2 - Terraço						
Piso cerâmico	0,012	0,9	1600	920		
Argamassa de assentamento	0,01	1,15	2000	1000		
Laje de concreto	0,1	1,75	2200	1000	2,463	0,406
Reboco	0,025	1,15	2000	1000		
Lã de vidro	0,1	0,045	50	700		
Forro (perfis alumínio)	0,015	230	2700	880		

Fonte: Adaptado da ABNT NBR 15220-2:2005 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005)

3.7.3 Definição da densidade de carga interna e padrão de uso e ocupação do edifício

A densidade de carga térmica considera os ganhos de calor proveniente das pessoas, dos equipamentos e da iluminação artificial, sendo os dois primeiros dados fixos em todas as simulações realizadas neste trabalho, pois são influenciados pelo padrão de ocupação do edifício. As áreas climatizadas da edificação correspondem as de uso permanente, enquanto as zonas transitórias não apresentam climatização artificial.

3.7.3.1 Configuração do sistema de iluminação

A densidade de potência de iluminação (DPI) foi configurada com base na INI-C (INMETRO, 2021), que estabelece o valor de 8,7 W/m² para um edifício de escritórios de planta livre classe A em eficiência energética. Dessa forma, a necessidade de iluminação pela ocupação ocorre nos dias de semana das 8h às 12h e das 13h30min às 18h. Aos sábados, o funcionamento do edifício ocorre das 8h às 12h, sendo considerado um sistema *On/Off* (liga/desliga). Como fração radiante do sistema de iluminação, foi utilizado o valor de 0,42, conforme o Manual *Input/Output Reference* (USDOE, 2018).

Além disso, foi considerado um sistema de iluminação dimerizável, sendo está a única forma de se considerar a integração da luz natural à artificial no *software EnergyPlus*. A fim de tornar isso possível, foram adicionados sensores, configurados para serem acionados quando a iluminância mínima a ser mantida em escritórios de 300lux não for atingida, conforme INI-C (INMETRO, 2021). Em cada zona térmica, foram posicionados dois sensores de luz natural no eixo central de cada sala. Os mesmos foram inseridos durante modelagem do edifício no *software SkechUp Make 15*, com *plugin Legacy Open Studio* versão 1.0.13 no item *New Daylighting Control Tool*.

3.7.3.2 Equipamentos e padrão de ocupação

No que diz respeito à configuração da ocupação do edifício, utilizou-se como base a INI-C (INMETRO, 2021), que estipula a densidade de ocupação em 10m²/pessoa como condição de referência em edifícios de escritórios, sendo considerado 0,5 para a fração radiante.

A configuração da agenda para estimar a carga térmica interna pelo uso dos equipamentos foi a mesma para a ocupação e sistema de iluminação do edifício. Para todas as simulações foi adotado o valor 0,25 para a fração radiante de ganho de calor pelos equipamentos, conforme especificado pela ASHRAE (2009). O valor de 15W/m² foi utilizado como base para a densidade de potência de equipamentos (DPE) considerando-se um edifício de escritórios de referência da INI-C (INMETRO, 2021), Tabela 21.

Tabela 21 - Densidade de carga térmica interna

FONTE	CARACTERÍSTICAS	REFERÊNCIAS
PESSOAS	10 m ² /pessoa	INI-C (Inmetro, 2021)
EQUIPAMENTOS	15,0 W/m ²	INI-C (Inmetro, 2021)
ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	8,7 W/m ² -Dimerizável	INI-C (Inmetro, 2021)

Fonte: INI-C (INMETRO, 2021)

3.7.4 Configuração do Sistema de Climatização Artificial

Para a configuração do sistema de climatização nas zonas térmicas de uso permanente, foi utilizado um sistema de ventilação híbrido, ou seja, que alterna ventilação natural e sistemas de climatização artificial (CBE, 2017), enquanto para as

zonas térmicas de uso transitório somente a ventilação natural foi considerada. A configuração do sistema híbrido de ventilação é apresentada a seguir.

A ventilação natural foi configurada pelo objeto *Airflow Network*. Por meio das aberturas do edifício, este item permite o dimensionamento do fluxo de ar entre as zonas térmicas e o ambiente externo. Assim, para a configuração da ventilação natural, foram configurados os seguintes campos:

a) *Airflow Network: Simulation Control* – Neste campo foram definidos os parâmetros básicos necessários para a realização dos cálculos de fluxo de ar e especificados os coeficientes de pressão do vento.

Tabela 22 - Airflow Network: Simulation Control

Airflow Network: Simulation Control	
Nome	Nome das zonas térmicas onde estão localizadas as aberturas
Controle do fluxo de ar	"Multizone without distribution" - o cálculo de ventilação das zonas acontece durante toda a simulação, mas o sistema de distribuição do ar não é modelado
Coeficiente de pressão do vento	"Surface average calculation" - os coeficientes de pressão são calculados automaticamente pelo software
Seleção da altura para cálculo da pressão do vento	"Opening Height" – os coeficientes de pressão são calculados automaticamente pelo software
Tipo do edifício	"Low Rise" - edifício retangular $h < 3 \times$ comprimento e $h < 3 \times$ largura
Razão do edifício (largura do eixo menor/ largura do eixo maior)	0,71

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: AUTORA, 2021. Dados do software *EnergyPlus*

b) *Airflow Network: Multizone: Zone* - Pela configuração deste campo foi possível estabelecer o controle da ventilação das esquadrias que podem ser abertas em determinada zona térmica.

Tabela 23 - Airflow Network: Multizone: Zone

Airflow Network: Multizone: Zone	
Nome da zona	Nome das zonas térmicas onde estão localizadas as aberturas
Modo de controle da ventilação	Temperatura.
Agenda de controle de temperatura	Nome da agenda de temperatura de controle da zona que controla a abertura das esquadrias para possibilitar a ventilação natural. A agenda estabelecida considerou a ventilação natural todos os dias do ano, durante 24h, considerando 25 renovações de ar por hora
Nome da agenda de funcionamento da ventilação	"Always On"- sempre funcionando
Coeficiente de padrão do vento	Padrão

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: AUTORA, 2021. Dados do software *EnergyPlus*

c) *Airflow Network: Multizone: Surface* – Neste campo foram especificadas todas as superfícies que apresentam ventilação natural, sendo determinadas suas propriedades como o fator de abertura, o modo de controle da ventilação e a agenda de funcionamento.

Tabela 24 - Airflow Network: Multizone: Surface

Airflow Network: Multizone: Surface	
Nome da superfície	Nome das superfícies com ventilação natural
Nome do componente	Especificação do tipo de abertura configuradas no campo <i>Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening</i>
Fator de abertura de janelas/portas	Portas e janelas operáveis. Janelas <i>maxim-ar</i> = 0,8 Portas de giro = 0,95*
Modo de controle da ventilação para cada abertura da zona térmica	Temperatura.
Agenda de controle de temperatura	Nome da agenda de temperatura de controle da zona que controla a abertura das esquadrias para possibilitar a ventilação natural. A agenda estabelecida considerou a ventilação natural todos os dias do ano, durante 24h, considerando 25 renovações de ar por hora
Nome da agenda de funcionamento da ventilação	"Always On" - sempre funcionando

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: CB3E (2018)*, *EnergyPlus*

d) *Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening* – Foram especificadas as propriedades da ventilação natural proveniente das esquadrias.

Tabela 25 - Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening

Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening	
Nome	Nome da abertura, definido pelo usuário
Coeficiente de fluxo de ar quando a abertura está fechada	Portas = 0,00171Kg/s.m Janelas = 0,00041Kg/s.m
Expoente de fluxo de ar quando a abertura está fechada	Portas = 0,65 Janelas = 0,5
Diferença mínima de densidade para fluxo bidirecional	Portas = 0,0001kg/m ³ Janelas = 0,0001kg/m ³
Coeficiente de descarga	Portas e Janelas = 0,60

Fonte: CB3E, 2018

Em relação ao sistema de climatização artificial, como não foi possível o acesso ao projeto de ar-condicionado do edifício, foi adotado um sistema de condicionadores de ar do tipo *Variable Refrigerant Flow* (VRF) por condensação a ar e operação em ciclo reverso, devido ao amplo uso em edifícios comerciais (BRUGNERA, 2018). Para dimensionamento e estabelecimento da capacidade do sistema de climatização artificial, foi realizada uma primeira simulação computacional no modo "autosize" no software *EnergyPlus*. Assim, a configuração do VRF ocorreu da seguinte maneira:

a) *HVAC Template: Thermostat* – Neste campo, foram estabelecidas as temperaturas de controle (*setpoints*) de aquecimento e resfriamento para todas as zonas térmicas de uso permanente.

Tabela 26 - HVAC Template: Thermostat

HVAC Template: Thermostat	
<i>Setpoint</i> de aquecimento (°C)	21
<i>Setpoint</i> de resfriamento (°C)	24*

* Valor estabelecido pela INI-C para edifícios de escritório

Fonte: AUTORA, 2021

b) *HVAC Template: Zone: VRF* – Neste objeto foram localizadas as evaporadoras do sistema de climatização, estabelecidas em todas as zonas de uso permanente.

Tabela 27 - HVAC Template: Zone: VRF

HVAC Template: Zone: VRF	
Nome da Zona	Nome de zona térmica onde a evaporadora se encontra
Nome da condensadora	Nome das unidades condensadoras configuradas no campo <i>HVAC Template: System: VRF</i>
Agenda de funcionamento do sistema de climatização	<i>On/Off</i> , todos dias do ano
Renovações de ar	0,0075m³/s por pessoa – 27m³/pessoa (ANVISA, 2003, p.3)
Potências e vazões de aquecimento e resfriamento	Modo “autosize” do software <i>EnergyPlus</i>
Eficiência do motor e do ventilador	0,90 e 0,70 respectivamente – Padrão software <i>EnergyPlus</i>

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: AUTORA, 2021. Dados do software *EnergyPlus*

c) *HVAC Template: System: VRF* – Neste campo foram inseridas as condensadoras, sendo um total de seis unidades, localizadas uma por pavimento.

Tabela 28 - HVAC Template: System: VRF

HVAC Template: System: VRF	
Nome da condensadora	Foram inseridas seis unidades condensadoras, sendo uma por pavimento analisado
Agenda de funcionamento do sistema de climatização	<i>On/Off</i> , todos dias do ano
Capacidade do ar-condicionado (aquecimento e resfriamento)	Modo “autosize” do software <i>EnergyPlus</i>
COP de resfriamento (W/W)	3,75W/W - eficiência padrão de mercado (BRUGNERA, 2018)
COP de aquecimento (W/W)	3,75W/W - eficiência padrão de mercado (BRUGNERA, 2018)

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: AUTORA, 2021. Dados do software *EnergyPlus*

A partir da configuração dos dados e da realização da simulação computacional, o *software EnergyPlus* gera um arquivo de saída do tipo .csv, onde é apresentado o dimensionamento do sistema de climatização artificial, conforme Tabela 29.

Tabela 29 - Capacidade do sistema de climatização artificial em KW

AirConditioner:VariableRefrigerantFlow	<i>Design Size Rated Total Cooling Capacity (gross) [KW]</i>	<i>Design Size Rated Total Heating Capacity [KW]</i>
CONDENSADORA_4PAV VRF HEAT PUMP	26,71484	26,71484
CONDENSADORA_5PAV VRF HEAT PUMP	34,62548	34,62548
CONDENSADORA_6PAV VRF HEAT PUMP	35,84538	35,84538
CONDENSADORA_7PAV VRF HEAT PUMP	35,70405	35,70405
CONDENSADORA_8PAV VRF HEAT PUMP	35,67834	35,67834
CONDENSADORA_9PAV VRF HEAT PUMP	41,24475	41,24475

Fonte: *EnergyPlus*

De posse da capacidade do sistema de ar-condicionado, os dados foram cruzados com a tabela 7.4 da INI-C (INMETRO, 2021), que determina a eficiência de condicionadores de ar do tipo VRF com condensação a ar e operação em ciclo reverso, para classificação classe A em eficiência energética. Assim, foram identificados o COP do sistema de climatização do quarto ao oitavo pavimento, que deveria ser de 4,28 W/W, enquanto o do nono pavimento deveria ser de 4,07 W/W, de acordo com a Tabela 30.

Tabela 30 - Eficiência mínima dos condicionadores de ar nível A, segundo a INI-C

Capacidade (KW)	Condição de classificação	Eficiência mínima classe A
≥ 19 KW e < 40 KW	Multi-split VRF	4,28 COP
≥ 40 e < 70 KW	Multi-split VRF	4,07 COP

Fonte: INI-C (INMETRO, 2021)

Desse modo, as características do sistema de climatização artificial configurado no *software EnergyPlus* são apresentadas na Tabela 31.

Tabela 31 - Características do sistema de climatização artificial

Tipo de equipamento	VRF com condensação a ar
Classificação	Multi-split VRF
Coeficiente de performance (COP)	4,28W/W (4º ao 8º pav) 4,07W/W (9º pav)
Setpoint (aquecimento)	21°C
Setpoint (resfriamento)	24°C
Eficiência motor	0,90
Eficiência ventilador	0,70
Renovações de ar	0,0075m³/s – 27m³/pessoa

Fonte: AUTORA, 2021, adaptado da INI-C (INMETRO, 2021) e *EnergyPlus*

Por fim, para finalizar a configuração do sistema de climatização do edifício e caracterização do modo híbrido de ventilação, foi preenchido o campo *Availability Manager: Hybrid Ventilation*. Neste objeto foram estabelecidas todas as zonas térmicas com ventilação híbrida, sendo elas consideradas de uso permanente. O funcionamento da ventilação híbrida foi definido de acordo com critérios de conforto adaptativo estabelecido pela ASHRAE 55 (2013).

Tabela 32 - Availability Manager: Hybrid Ventilation

Availability Manager: Hybrid Ventilation	
Nome da zona de controle	Nome das zonas térmicas com ventilação híbrida. Foram consideradas todas as zonas de uso permanente
Agenda de controle da ventilação	Todos os dias do ano, 24h por dia. Funcionamento estabelecido de acordo com os critérios de conforto adaptativo da ASHRAE 55 (2013)

* Demais valores foram mantidos conforme padrão do software *EnergyPlus*

Fonte: AUTORA, 2021. Dados do software *EnergyPlus*; ASHRAE 55 (2013)

3.8 Configuração computacional de desempenho termoenergético dos Casos de Referência

Os Casos de Referência seguiram a mesma configuração do Caso Base no que se refere aos padrões de ocupação, iluminação, equipamentos, climatização e parâmetros construtivos. Foram modificadas exclusivamente as características da fachada para análise do desempenho energético das diferentes tipologias.

Na Tabela 33, é apresentado um resumo da configuração computacional no *EnergyPlus*, comum a todos os modelos analisados. Os dados computacionais específicos das diferentes tipologias de fachadas são apresentados na sequência.

Tabela 33 - Configuração computacional software *EnergyPlus*

Localização	Santa Maria-RS (Latitude: 29°68'S, Longitude: 53°81' W)
	Arquivo climático de Santa Maria (INMET, 2018)
Divisão das zonas térmicas	A divisão interna das zonas térmicas permaneceu constante em todas as simulações. Variaram os parâmetros da fachada, como por exemplo as dimensões das aberturas, presença ou não de revestimento de vidro, cavidade ventilada etc.
Envelope construtivo	CONSTANTE
	Estrutura de concreto armado, laje de 10cm de espessura
	Cobertura - fibrocimento e terraço
	Forro - perfis metálicos com isolamento de lã de vidro
	Piso - revestimento cerâmico
	Portas internas - compensado de madeira
	VARIÁVEL
	Paredes externas
	Janelas (dimensões, tipo de vidro)

Uso e ocupação do edifício	Dias da semana 8h às 12h e 13:30h às 18:00h
	10 m ² /pessoa
Iluminação	Dimerizável - 300lux
	DPI = 8,7W/m ²
Equipamentos	DPE= 15W/m ²
Climatização	Ventilação híbrida
	Multi-split VRF
	COP 4,28W/W (4°ao 8°PAV.) COP 4,07W/W (9°PAV)
	Setpoint de aquecimento 21°C
	Setpoint de resfriamento 24°C

Fonte: AUTORA, 2021

3.8.1 Caso de Referência CR-1

O CR-1 apresenta acréscimo de dispositivos de sombreamento do tipo persiana nas janelas da edificação (Figura 49). A persiana foi considerada entre vidros e teve suas características configuradas no campo *Window Material: Property*, correspondendo a uma persiana horizontal de 3cm, condutividade de 0,9W/m.k.

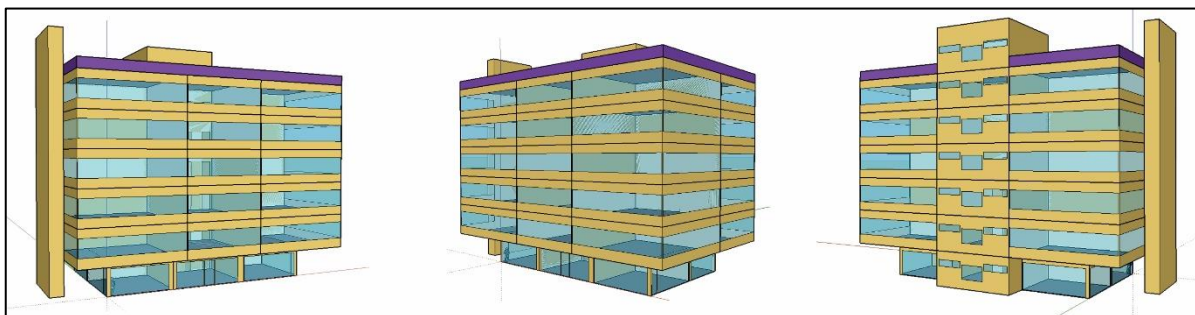


Figura 49 - Modelo tridimensional CR-1

Fonte: AUTORA, 2021

Para a definição do acionamento das persianas, as mesmas foram consideradas automatizadas, sendo acionadas em condições de ofuscamento, conforme designado pela INI-C (INMETRO, 2021) com base nas regulamentações da IESNA LM 83 (IESNA, 2012). Para que o controle das persianas ocorra em função do ofuscamento, é necessário o estabelecimento da iluminação dimerizável no *EnergyPlus*. Assim, o modo de controle das persianas foi configurado no campo *Window Property: Shading Control*, conforme Tabela 34.

O índice de ofuscamento máximo permitido foi considerado igual a 19, de acordo com a NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) para salas onde as tarefas exigidas constituem computação e escrita, sendo configurado no campo *Daylight: Controls*.

Tabela 34 - Configuração do modo de controle das persianas no *EnergyPlus*

Window Property: Shading Control	
Nome	Nome definido pelo usuário, para controle da persiana. Este objeto foi referenciado no campo " <i>Fenestration Surface: Detailed</i> " em todas as aberturas onde foram acrescentadas as persianas
Tipo de sombreamento	Entre vidros. As persianas foram consideradas acopladas entre os vidros das esquadrias, de acordo com a configuração no campo " <i>Construction</i> " (vidro laminado absorvente cinza 6mm + ar 38mm + persiana + ar 38mm + vidro laminado incolor 6mm)
Tipo de controle do sombreamento	" <i>OnIfHighGlare</i> " – O sombreamento é ativado em condições de ofuscamento, definido no campo <i>Daylight: Controls</i>
Agenda de funcionamento	O controle das persianas é ativado durante o período de ocupação do escritório

Fonte: AUTORA, 2021. *EnergyPlus*

3.8.2 Caso de Referência CR-2

O caso de referência CR-2 substitui o vidro absorvente cinza de 6mm do Caso Base por um vidro do tipo *low-e* (Figura 50). As propriedades ópticas dos vidros foram configuradas no campo *Window Material: Glazing*, sendo apresentadas na Tabela 35.

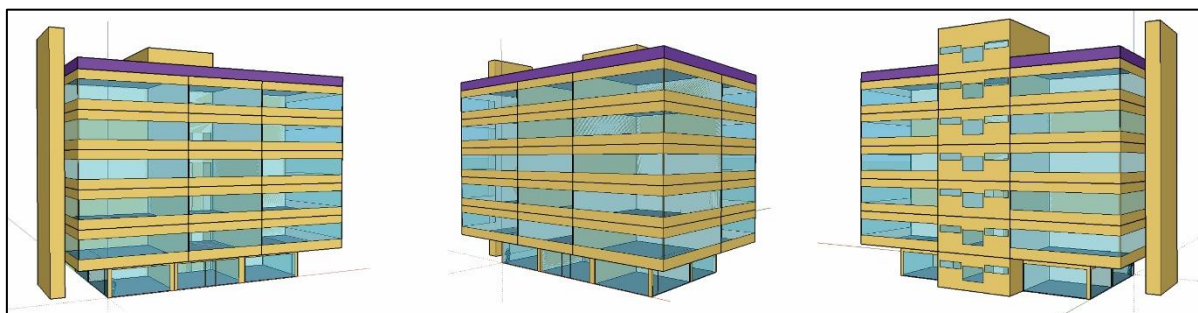


Figura 50 - Modelo tridimensional CR-2

Fonte: AUTORA, 2021

Tabela 35 - Propriedades ópticas dos vidros presentes no CR-2

Propriedades ópticas dos vidros	V1	V2	V3
Espessura (mm)	0,006	0,006	0,006
Transmitância a radiação solar (incidência normal)	0,259	0,259	0,769
Refletância a radiação solar na face 1 (incidência normal)	0,381	0,381	0,074
Refletância a radiação solar na face 2 (incidência normal)	0,0546	0,0546	0,073
Transmitância a radiação solar no espectro visível (incidência normal)	0,688	0,688	0,892
Refletância a radiação visível na face 1 (incidência normal)	0,071	0,071	0,084
Refletância a radiação visível na face 2 (incidência normal)	0,045	0,045	0,083
Transmitância em ondas longas (incidência normal)	0	0	0
Emissividade em ondas longas na face 1 (incidência normal)	0,84	0,84	0,84
Emissividade em ondas longas na face 2 (incidência normal)	0,02	0,02	0,84
Condutividade (W/m ² .k)	1	0,511	0,68

V1 - vidro low-e 6mm Ref. 3457, *software* Window 7.7

V2 - vidro low-e 6mm Ref. 3457 com a condutividade térmica alterada

V3 - vidro laminado incolor 6mm Ref. 3068, *software* Window 7.7

Fonte: LBNL, 2021

Assim, as esquadrias externas foram configuradas com *SHGC* igual a 0,297 e Fator de transmitância (*U*) de 1,502W/m².k, de acordo com a Tabela 36.

Tabela 36 - Propriedades térmicas dos vidros das esquadrias CR-2

Caso de Referência	Composição Esquadria (<i>Construction</i>)	SHGC	U (W/m ² .K)
CR-2	Vidro laminado <i>low-e</i> 6mm	0,297	1,502
	Câmara de ar de 13mm		
	Vidro laminado incolor 6mm		

Fonte: LBNL, 2021

O revestimento envidraçado da fachada foi configurado no campo *Surface Control: Movable Insulation*, onde foi inserido o vidro *low-e* com a condutividade térmica alterada, de 0,511W/m².k (Apêndice B), a fim de se considerar o efeito estufa ocasionado pela presença de uma camada de ar entre a superfície transparente e a opaca (peitoril de alvenaria) (Tabela 37).

Tabela 37 - Configuração do objeto Surface Control: Movable Insulation

Parâmetros	Variáveis
Tipo de isolamento	Externo
Nome da superfície	Nome faces das paredes
Nome do material	Vidro <i>low-e</i> com a condutividade térmica alterada – 0,511W/m ² .k
Agenda de funcionamento	Sempre funcionando (<i>Always on</i>)

Fonte: AUTORA, 2021

3.8.3 Caso de Referência CR-3A, CR-4A e CR-5A

Para o desenvolvimento dos modelos computacionais dos Casos de Referência CR-3A, CR-4A e CR-5A, com fachada dupla ventilada, foram modeladas zonas térmicas em toda extensão das fachadas, com profundidades de cavidade variável, 0,60m para o CR-3A, 0,80m para o CR-4A e 1,00m para o CR-5A (Figura 51). Visando evitar o sobreaquecimento dos pavimentos superiores em função do efeito chaminé, a altura da cavidade ventilada foi modelada 1,5m maior do que o edifício (BARBOSA; IP, 2014; POMPONI; BARBOSA; PIROOZFAR, 2017).

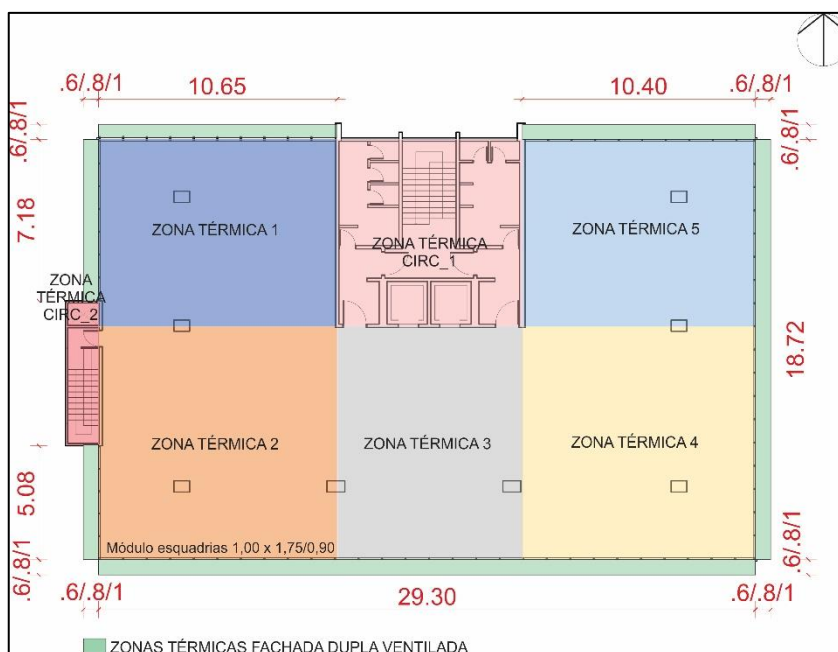


Figura 51 - Planta baixa do pavimento tipo com indicação das zonas térmicas do CR-3A/4A/5A
Fonte: AUTORA, 2021

As zonas térmicas correspondentes à fachada dupla estão presentes em cinco pavimentos, do quinto ao nono andar, uma vez que o quarto andar é recuado em relação aos demais. A Figura 52 representa o modelo tridimensional destes modelos de referência, sob diferentes ângulos.

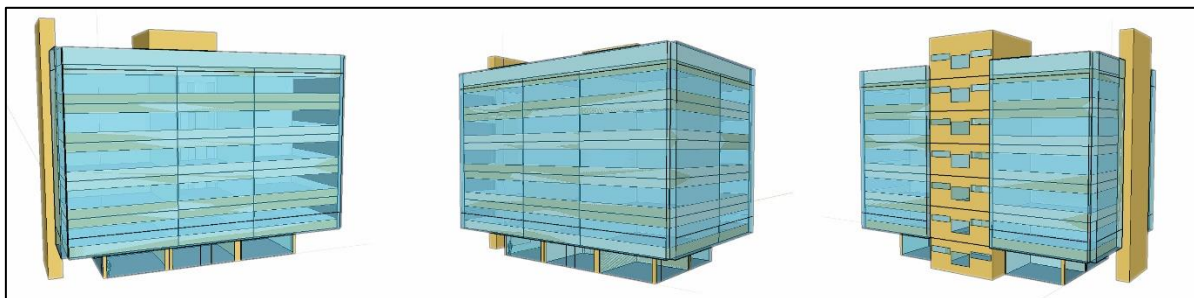


Figura 52 - Modelos tridimensionais CR-3A, CR-4A e CR-5A
Fonte: AUTORA, 2021

A geometria adotada para a cavidade ventilada foi do tipo multipavimentos, portanto, sem divisões internas verticais e horizontais e com cortina de ar externa (Figura 53). Sendo assim, a pele de vidro externa da edificação foi configurada com aberturas inferiores e superiores para entrada e saída do ar da cavidade ventilada, controladas por uma agenda de funcionamento que as mantém abertas durante todo o ano. A altura e a largura dessas aberturas são fixas em toda a extensão da fachada e altura correspondente a 10% da área da envidraçada na qual estão inseridas.

Tabela 38 - Propriedades ópticas dos vidros

Propriedades ópticas dos vidros	V1	V2	V3
Espessura (mm)	0,006	0,006	0,008
Transmitância a radiação solar (incidência normal)	0,493	0,769	0,733
Refletância a radiação solar na face 1 (incidência normal)	0,06	0,074	0,071
Refletância a radiação solar na face 2 (incidência normal)	0,063	0,073	0,07
Transmitância a radiação solar no espectro visível (incidência normal)	0,437	0,892	0,883
Refletância a radiação visível na face 1 (incidência normal)	0,058	0,084	0,083
Refletância a radiação visível na face 2 (incidência normal)	0,062	0,083	0,083
Transmitância em ondas longas (incidência normal)	0	0	0
Emissividade em ondas longas na face 1 (incidência normal)	0,84	0,84	0,84
Emissividade em ondas longas na face 2 (incidência normal)	0,84	0,84	0,84
Condutividade (W/m ² .k)	0,68	0,68	0,749
V1 - vidro absorvente cinza 6mm Ref: 2150, <i>software</i> Window 7.7			
V2 - vidro laminado incolor 6mm Ref: 3068, <i>software</i> Window 7.7			
V3 - vidro laminando incolor 8mm Ref: 3074, <i>software</i> Window 7.7			

Fonte: LBNL, 2021

Dessa forma, a composição dos vidros da fachada apresentam SHGC de 0,534 e U de 1,767W/m².k, segundo a Tabela 39.

Tabela 39 - Composição dos vidros da fachada

Casos de Referência	Composição	Cavidade ventilada (cm)	SHGC da fachada	U (W/m ² .K)
CR-3A, CR-4A e CR-5A	Camada externa - vidro laminado incolor 8mm	variável 60 (CR-3) 80 (CR-4) 100 (CR-5)	0,534	1,767
	Cavidade ventilada			
	Camada interna/ Esquadria: vidro insulado (vidro laminado absorvente cinza 6mm+ar 13mm +vidro laminado incolor 6mm)			

Fonte: LBNL, 2021

O fluxo de ar que ocorre no interior da cavidade ventilada foi configurado como ventilação natural. Foram adicionados, no campo *AirFlow Network*, os dados correspondentes às superfícies presentes nas zonas térmicas equivalentes a fachada dupla. De acordo com Alberto, Ramos e Almeida (2017), em espaços ventilados naturalmente, como a cavidade de uma fachada dupla, o campo *AirFlow Network* pode ser utilizado para simulação do vento e efeito chaminé.

Assim, no campo *Airflow Network: Multizone: Zone*, foram inseridas as zonas térmicas da fachada dupla, com controle de ventilação constante e padrão de funcionamento que possibilita a ventilação durante todo o tempo.

Tabela 40 - Adições Airflow Network: Multizone: Zone

Airflow Network: Multizone: Zone	
Nome da zona	Nome das zonas térmicas correspondentes a fachada dupla
Modo de controle da ventilação	Constante
Nome da agenda de funcionamento da ventilação	"Always On"- sempre funcionando
Coeficiente de padrão do vento	Padrão

Fonte: AUTORA, 2021

Já no campo *Airflow Network: Multizone: Surface*, foram acrescentadas todas as aberturas presentes nas zonas térmicas com fachada dupla, com controle de ventilação constante e fator de abertura que as considera totalmente abertas, ou seja, as janelas são fictícias, sendo desenhadas durante a modelagem do edifício para permitir a ventilação natural no *EnergyPlus*.

Tabela 41 - Adições Airflow Network: Multizone: Surface

Airflow Network: Multizone: Surface	
Nome da superfície	Nome das superfícies com ventilação natural presentes nas zonas térmicas correspondentes a fachada dupla
Nome do componente	Especificação do tipo de abertura configuradas no campo <i>Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening</i>
Fator de abertura de janelas/portas	1 – As aberturas existentes na fachada dupla estão 100% abertas
Modo de controle da ventilação para cada abertura da zona térmica, correspondente a fachada dupla	Constante
Nome da agenda de funcionamento da ventilação	"Always On"- sempre funcionando

Fonte: AUTORA, 2021.

O coeficiente de descarga de 0,62 (POMPONI; BARBOSA; PIROOZFAR, 2017) foi adicionado no item *Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening*, sendo possível por ele representar as trocas de ar naturais que ocorrem devido ao fenômeno de fluabilidade térmica. Este fenômeno permite que o ar se mova no interior da cavidade ventilada, representando, assim, o efeito chaminé (USDOE, 2018).

Tabela 42 - Adições Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening

Airflow Network: Multizone: Component: Simple Opening	
Nome	Nome da abertura, definido pelo usuário/Ventilação aberturas da fachada dupla
Coeficiente de descarga	0,62

Fonte: POMPONI, BARBOSA E PIROOZFAR, 2017

3.8.4 Caso de Referência CR-3B, CR-4B e CR-5B

Os casos de referência CR-3B, CR-4B e CR-5B apresentaram mesma modelagem e configuração semelhante às dos casos CR-3A, CR-4A e CR-5A. Como o que difere é a ausência do revestimento de vidro na camada interna, nesses modelos o campo *Surface Control: Movable Insulation* não foi configurado, uma vez que a camada interna da edificação corresponde a uma fachada tradicional. Na Figura 54, é apresentado um corte esquemático dessa tipologia de fachada.

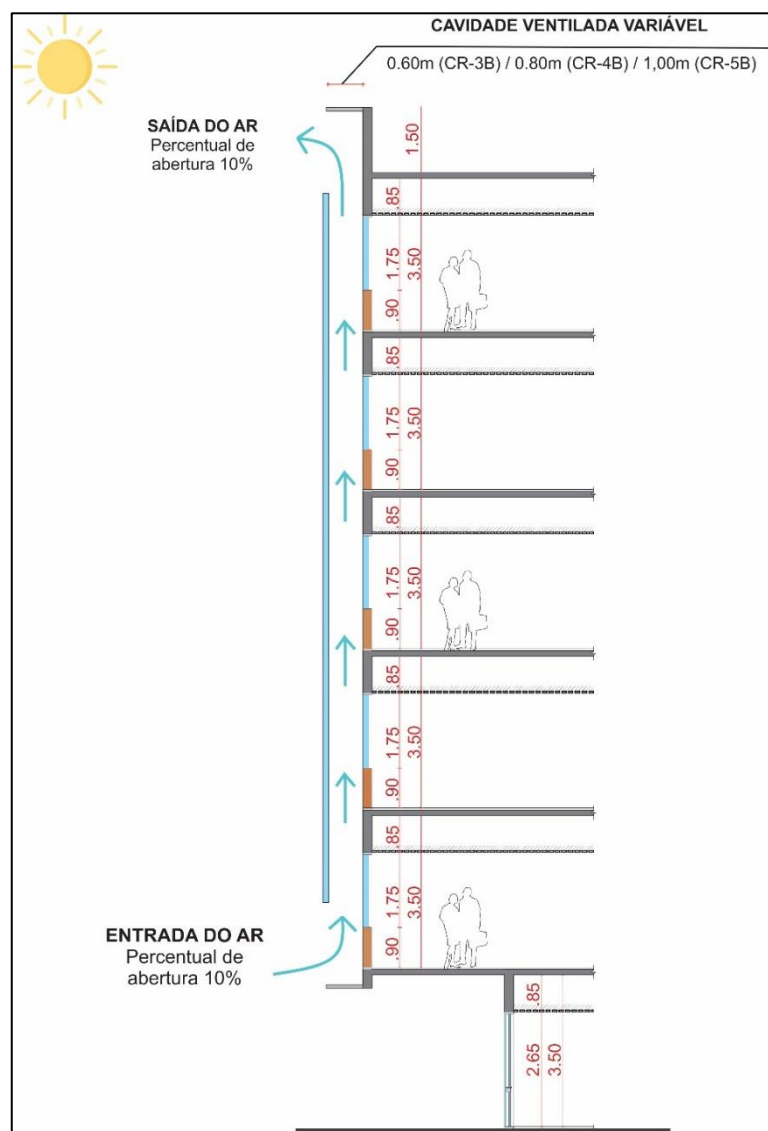


Figura 54 - Corte esquemático CR-3B, CR-4B e CR-5B
Fonte: AUTORA, 2021

3.8.5 Caso de Referência CR-6

Para simulação computacional do CR-6, com fachada cortina, a área das aberturas foi ampliada em relação ao CB, uma vez que o peitoril em alvenaria foi eliminado, passando seu PAF a ser de 75%. Dessa maneira, a largura das janelas

permaneceu constante, enquanto a altura passou de 1,75m para 2,65m. O modelo tridimensional do caso CR-6 é apresentado na Figura 55.

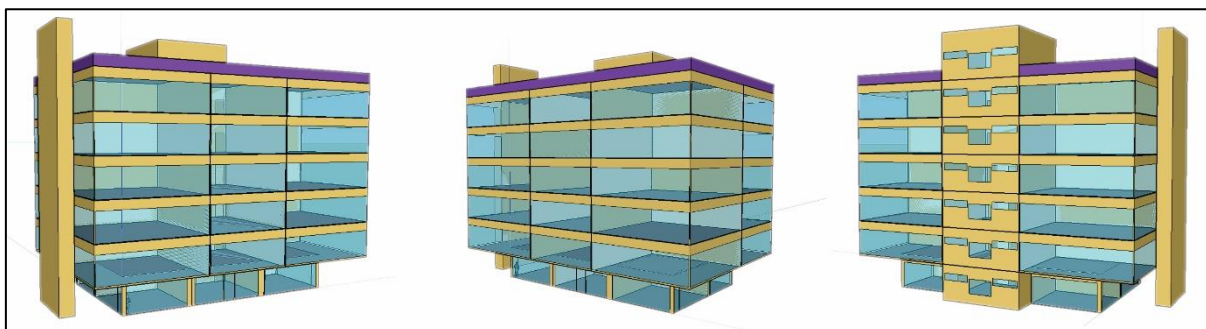


Figura 55 - Modelo tridimensional CR-6
Fonte: AUTORA, 2021

Os vidros configurados no CR-6 apresentam SHGC de 0,564 e U igual a 2,732W/m².K, conforme a Tabela 43.

Tabela 43 - Propriedades térmicas dos vidros das esquadrias do CR-6

Caso de Referência	Composição Esquadria (<i>Construction</i>)	SHGC	U (W/m ² .K)
CR-6	Vidro laminado absorvente cinza 6mm	0,564	2,732
	Câmara de ar de 13mm		
	Vidro laminado incolor 6mm		

Fonte: LBNL, 2021

3.8.6 Caso de Referência CR-7 e CR-8

Os casos de referência CR-7 e CR-8 correspondem a tipologia construtiva com fachada cortina, PAF de 75%, com a adição de um dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada com 25% e 50% de perfuração, respectivamente, em todas as faces da edificação (Figura 56). Para a modelagem destes casos de referência foram criadas superfícies afastadas 0,60m da fachada do edifício, representando um sombreamento criado pelo objeto *Shading Group* do plugin *Euclid*.

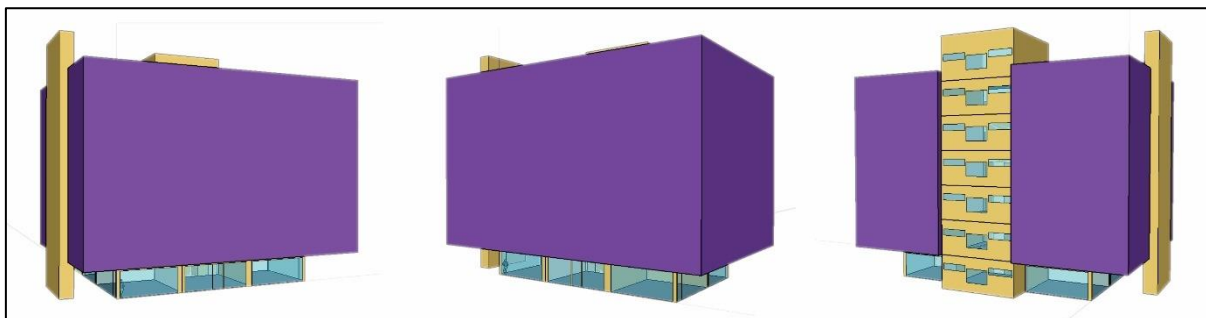


Figura 56 - Modelo tridimensional CR-7 e CR-8
Fonte: AUTORA, 2021

O percentual de perfuração de cada um dos casos foi adicionado posteriormente, durante configuração no *EnergyPlus*, em que foram criadas agendas de funcionamento, no objeto *Schedule Compact*, para cada uma das superfícies correspondentes as telas perfuradas adicionadas. A configuração deste objeto é apresentada na Tabela 44.

Tabela 44 - Configuração CR-7 e CR-8

<i>Schedule Compact</i>	
CR-7	
Nome da agenda de funcionamento	Tela perfurada 25% de perfuração
	<i>Fraction</i>
	Todos os dias do ano, durante 24h
	0,25 - Representação do percentual de perfuração
CR-8	
Nome da agenda de funcionamento	Tela perfurada 50% de perfuração
	<i>Fraction</i>
	Todos os dias do ano, durante 24h
	0,50 - Representação do percentual de perfuração

Fonte: AUTORA, 2021

Posteriormente, a agenda de funcionamento foi referenciada no campo *Shading Building Detailed*, onde cada uma das superfícies de sombreamento apresenta uma agenda que as mantêm abertas em uma fração de 25% para o CR-7 ou de 50% para o CR-8. Os vidros da fachada configurados nos casos CR-7 e CR-8 apresentam SHGC de 0,564 e U igual a 2,732W/m².k.

3.8.7 Caso de Referência CR-9, CR-10 e CR-11

Os casos de Referência CR-9, CR-10 e CR-11 apresentam fachada dupla com profundidade de cavidade ventilada naturalmente variável, sendo elas: 0,60m para o CR-9, 0,80m para o CR-10 e 1,00m para o CR-11. Nestes casos, uma pele extra de vidro incolor, de 8mm, com aberturas para entrada e saída de ar com altura correspondente a 10% da área da fachada, foi adicionada a uma fachada cortina, com PAF de 75% (Figura 57).

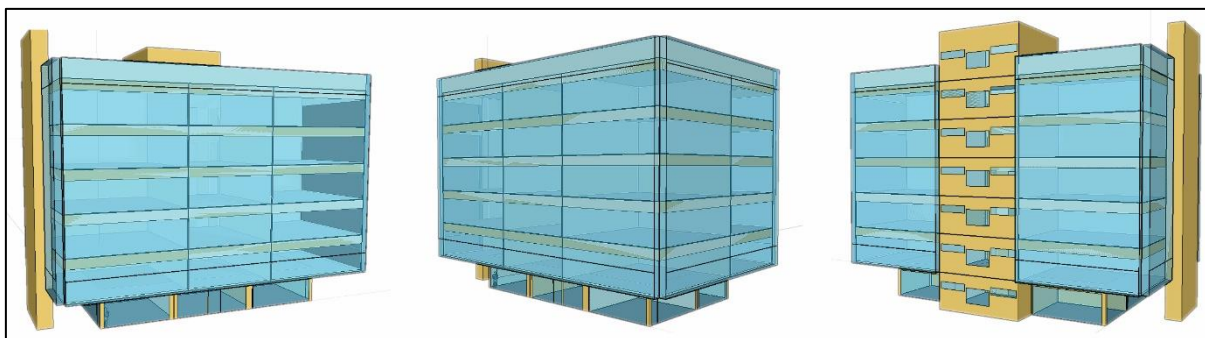


Figura 57 - Modelo computacional CR-9
Fonte: AUTORA, 2021

A configuração computacional desses modelos segue a já apresentada nos casos CR-3A, CR-4A e CR-5A, que possuem características semelhantes. A diferença ocorre nas aberturas que apresentam altura de 2,65m. Na Tabela 45, é apresentado um comparativo entre os modelos com fachada dupla, enquanto a Figura 58 representa um corte esquemático dos casos de referência CR-9, CR-10 e CR-11.

Tabela 45 - Tabela comparativa entre os Casos de Referência com fachada dupla ventilada

Casos de Referência	CR-3A, CR-4A e CR-5A	CR-9, CR-10 e CR-11
Tipo de fachada	Fachada dupla ventilada naturalmente	
Cavidade ventilada	Profundidade variável 0,60m (CR-3A e CR-9); 0,80m (CR-4A e CR-10); 1,00m (CR-5A e CR-11); Largura da cavidade constante, em toda extensão da fachada; Altura da cavidade 1,50m superior à altura do edifício para evitar o super aquecimento dos pavimentos superiores	
Geometria da cavidade ventilada	Multipavimentos com cortina de ar externa	
Percentual de abertura da cavidade para entrada e saída de ar	10% da área da fachada	
Coeficiente de descarga	0,62	
Composição da fachada	Camada externa - vidro laminado incolor 8mm	
	Câmara de ar com profundidade variável	
	Camada interna - Fachada semi-cortina com PAF de 50%	Camada interna - Fachada cortina com PAF de 75%
Esquadrias (camada interna)	Vidro laminado absorvente cinza 6mm	
	Câmara de ar de 13mm	
	Vidro laminado incolor 6mm	
SHGC dos vidros da fachada	0,534	
Fator U dos vidros (W/m²k)	1,767	
Altura das esquadrias (camada interna)	1,75m	2,65m

Fonte: AUTORA, 2021

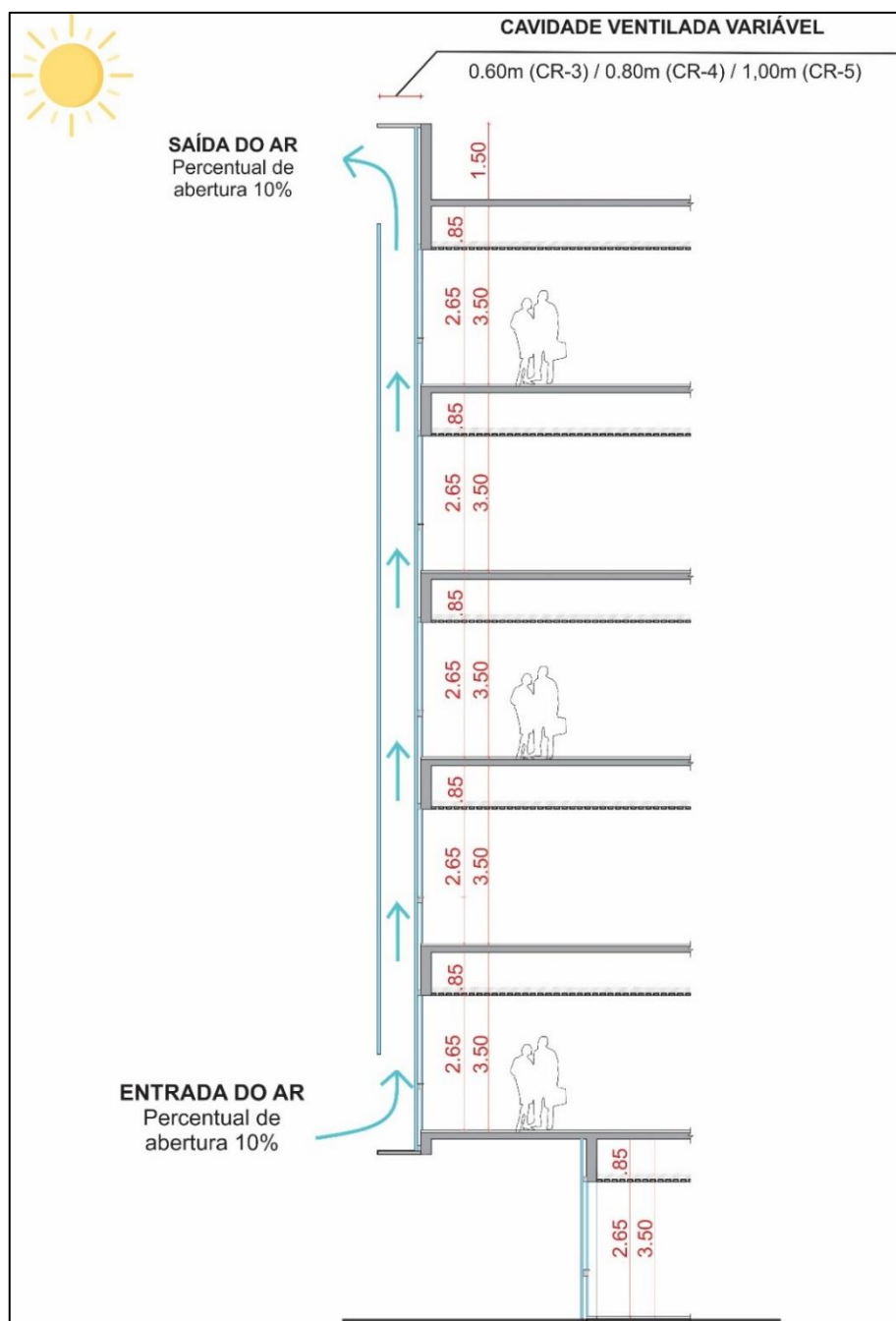


Figura 58 - Corte esquemático da fachada dupla ventilada, CR-9, CR-10 e CR-11
 Fonte: AUTORA, 2021

3.9 Método de análise dos resultados

O consumo energético global anual de um edifício é composto por climatização artificial para aquecimento e resfriamento, iluminação artificial e equipamentos. Nesta pesquisa, o consumo para equipamentos foi constante em todos os casos analisados.

Ao longo das simulações computacionais, foi necessário considerar a iluminação artificial como dimerizável nas avaliações termoenergéticas, o que ocorreu devido ao controle de acionamento da persiana (no caso CR-1) ser ativado em função

do ofuscamento, conforme especificado pela INI-C (INMETRO, 2021). Entretanto, os dados de iluminação artificial não serão apresentados nos resultados, devido a inconsistências identificadas durante as análises de luz natural no *software EnergyPlus*.

Sendo assim, os resultados de desempenho termoenergético são apresentados pelo consumo anual para climatização artificial, em kWh/m².ano de área condicionada, enquanto a iluminação natural é abordada de forma qualitativa nas avaliações de desempenho lumínico.

Dessa forma, para determinação de qual(is) tipologia(s) de fachada(s) envidraçada(s) apresenta(m) o maior ponto de equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético para a ZB2, buscou-se o cenário com maior acesso à iluminação natural e qualidade lumínica combinada ao baixo consumo de energia para climatização artificial, ou seja, altos níveis de sDA e UDI aliados a baixos níveis de ASE, DGP e consumo de energia para ar-condicionado, conforme a Figura 59.

Ressalta-se que o ofuscamento foi considerado um fator determinante, uma vez que, em condições de excesso de brilho, estudos como os de Signorini (2015) demonstram a tendência dos usuários intervirem no edifício com o uso de cortinas e/ou persianas. Isso pode favorecer o aumento do consumo para iluminação artificial, assim como comprometer os benefícios provenientes do uso de fachadas envidraçadas, como transparência, maior contato com o ambiente externo e aproveitamento da iluminação natural.



Figura 59 - Critérios de definição para a solução de fachada ideal
Fonte: AUTORA, 2021

Na Figura 60, é apresentado um resumo esquemático de todos os casos com fachadas envidraçadas analisados ao longo desta pesquisa.

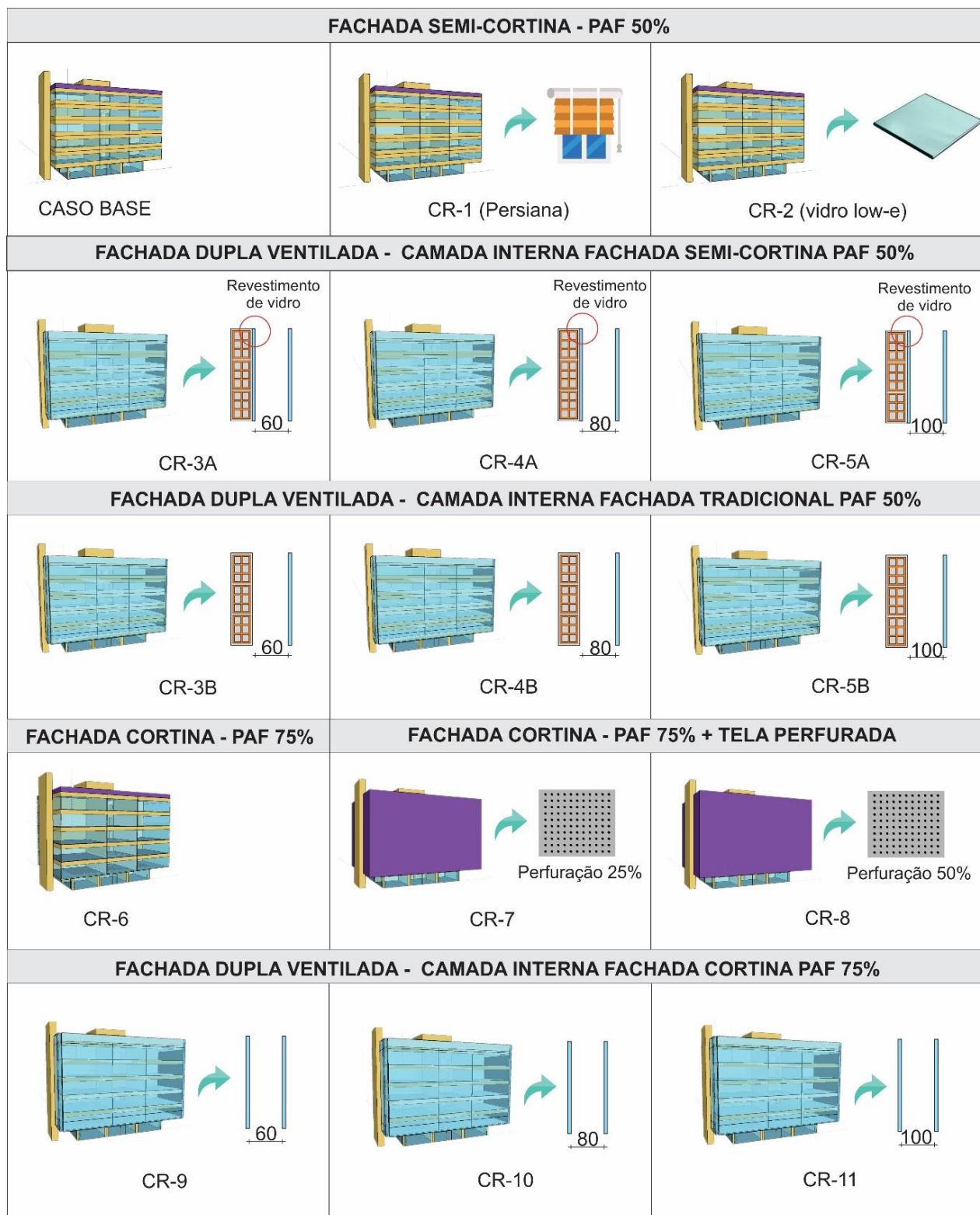


Figura 60 - Resumo esquemático dos casos analisados, com diferentes tipologias de fachadas envidraçadas

Fonte: AUTORA, 2022

4 Resultados

Este trabalho buscou evidenciar a influência de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas no equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético em um edifício comercial, localizado na ZB2. Como método de análise, foi adotada a simulação computacional dinâmica realizada por meio dos *softwares EnergyPlus* (avaliações termoenergéticas) e *Rhinoceros* com *plugin ClimateStudio* (luz natural).

Para a avaliação do desempenho termoenergético, foi considerado o consumo para climatização artificial do edifício, enquanto as avaliações de iluminação natural consideraram a disponibilidade e a qualidade dessa iluminação. Assim, com o intuito de facilitar a compreensão dos resultados, os mesmos serão apresentados por partes: desempenho termoenergético, desempenho lumínico e, por fim, desempenho lumínico x termoenergético.

Os resultados do consumo energético total do CB são apresentados no Apêndice C.

4.1 Avaliações de desempenho termoenergético

Por meio dos resultados contidos na Figura 61, torna-se possível identificar os consumos para aquecimento e resfriamento, além do consumo total para climatização artificial do Caso Base (CB) e dos Casos de Referência (CRX). Pode-se perceber que a inclusão de um dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada (CR-7 e CR-8), o uso de um vidro de baixa emissividade (CR-2), a configuração da fachada como nos casos com fachada dupla ventilada (CR-3B, CR-4B e CR-5B), e a adoção da persiana (CR-1), representaram uma redução na demanda de energia para climatização do edifício.

Por outro lado, os casos com fachada cortina (CR-6) e fachada dupla ventilada com revestimento de vidro na camada interna e diferentes PAF (CR-3A, CR-4A e CR-5A e CR-9, CR-10 e CR-11) impactaram negativamente o consumo para ar-condicionado.

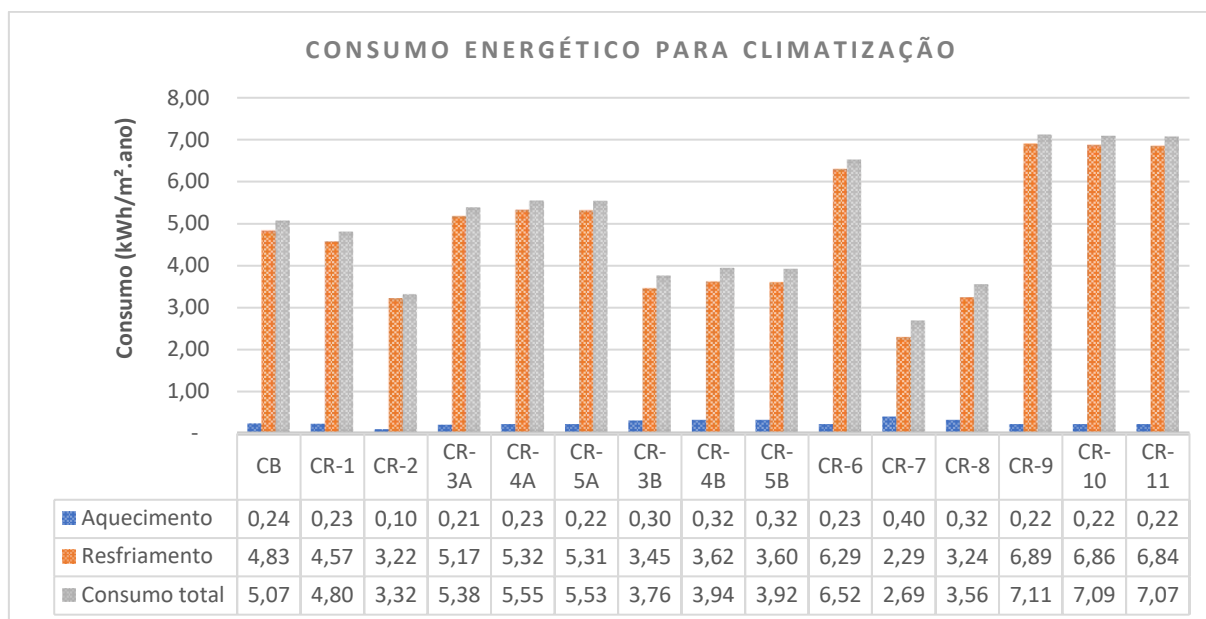


Figura 61 - Gráfico de demanda de energia do edifício para climatização artificial
 Fonte: AUTORA, 2021

A adição de um dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada com 25% de perfuração (CR-7) mostrou-se a alternativa mais vantajosa para a redução do consumo de energia para climatização artificial, com economia de 46,89% em comparação ao CB. Já o caso com 50% de perfuração da tela (CR-8) diminuiu o consumo em 29,81%.

Neste caso, é importante observar que a redução da demanda energética da edificação ocorreu ainda que os casos de referência CR-7 e CR-8 apresentem PAF, mais alto do que o CB, 75% e 50%, respectivamente. É esperado que o aumento do PAF proporcione um aumento no consumo para ar-condicionado, no entanto, ao ser adicionado um elemento de controle solar, o PAF não impactou substancialmente nos resultados, uma vez que a tela perfurada funcionou como uma barreira contra a radiação solar direta, reduzindo o consumo para resfriamento da edificação de 4,83kWh/m².ano do CB para 2,29kWh/m².ano no CR-7, uma redução de 52,51%.

O aumento da área de perfuração da tela para 50% (CR-8) levou a uma economia menor para resfriar a edificação, todavia, ainda se mostrou uma opção benéfica, reduzindo em aproximadamente 33% o consumo para resfriamento, com valor de 3,24kWh/m².ano. Vale ressaltar que o CR-7, por sombrear 75% da área das aberturas, limita em maior medida o acesso à luz natural, comparado ao CR-8, o que pode representar um aumento no consumo para iluminação artificial.

Em ambos os casos, houve um aumento no consumo para aquecimento de 0,24kWh/m².ano do CB, para 0,40kWh/m².ano e 0,32kWh/m².ano para os casos CR-7 e CR-8, respectivamente, entretanto, esse aumento foi compensado pela redução no consumo para resfriar a edificação, de 1,51kWh/m².ano.

Seguido do dispositivo de sombreamento com menor percentual de perfuração, a fachada semi-cortina com vidro *low-e* (CR-2) se mostrou uma alternativa eficaz para a redução do consumo energético, representando uma economia de energia de 34,49%, quando comparado ao CB. A demanda final de energia do CR-2 foi de 3,32kWh/m².ano, sendo os consumos de aquecimento e resfriamento de 0,10kWh/m².ano e 3,22kWh/m².ano, correspondendo a uma redução na energia necessária para aquecimento e resfriamento de 58,49% e 33,31%, respectivamente, em comparação ao CB. Isso ocorreu porque o vidro *low-e* restringe as transferências de calor para o ambiente interno, minimizando o consumo da edificação.

Assim, pode-se observar que, em relação ao consumo para climatização artificial, para a ZB2, uma fachada envidraçada com baixo fator solar, SHGC de 0,297 e U de 1,502W/m².K, potencializou a economia de energia quando comparada a uma fachada com SHGC igual 0,564 e U de 2,732W/m².k (CB). Estudos como os de Andreis *et al.* (2014), Fasi e Budawi (2015) e Brugnera (2019) também demonstraram que o vidro *low-e* consegue promover o melhor desempenho energético da edificação.

Quando comparado o uso de um vidro baixo emissivo e um elemento de controle solar com 50% de perfuração, casos CR-2 e CR-8, observou-se que ambos apresentaram comportamento térmico bastante semelhante, principalmente no que diz respeito às demandas energéticas para resfriamento da edificação, com uma diferença de apenas 0,02kWh/m².ano. O caso com vidro *low-e* apresentou menor consumo final, 3,32kWh/m².ano, contra 3,56kWh/m².ano do caso CR-8. Todavia, é importante destacar que o elemento de controle solar conseguiu equilibrar os ganhos solares, mesmo com um PAF mais elevado. Já a proteção solar com 25% de perfuração, caso CR-7, apresentou desempenho superior a ambas as situações.

Além disso, a análise de desempenho termoenergético permitiu identificar que uma fachada dupla em que a camada interna corresponde a uma fachada tradicional com PAF de 50% (CR-3B, CR-4B e CR-5B) foi capaz de reduzir o consumo de energia em todas as situações analisadas, quando comparado ao CB, mostrando-se uma alternativa viável para propostas de *retrofit* em fachadas tradicionais, quando se almeja a estética contemporânea proporcionada pelas fachadas de vidro. A camada

adicional de vidro minimizou o consumo energético para ar-condicionado em 25,83% considerando a menor profundidade de cavidade, 0,60m (CR-3B); 22,27% para a cavidade de 0,80m (CR-4B); e 22,59% para a cavidade de 1,00m (CR-5B).

A melhora no desempenho energético do edifício ocorreu principalmente pela capacidade da fachada dupla de minimizar as demandas para resfriamento, com uma economia de 28,50%, 25,17% e 25,43% para os casos CR-3B, CR-4B e CR-5B, respectivamente. Essa situação aconteceu porque a segunda camada de vidro consegue barrar parcialmente a radiação solar direta, combinada aos benefícios provenientes da cavidade ventilada, que contribui para menores trocas de calor entre os espaços interno e externo.

Para o contexto climático analisado, uma cavidade ventilada com menor profundidade se mostrou vantajosa, uma vez que, em cavidades mais estreitas, a velocidade do fluxo de ar é maior, minimizando as trocas de calor com o ambiente interno e consequentemente reduzindo o consumo para resfriamento do edifício.

Entre as soluções analisadas, a adição de persianas (CR-1) foi a que apresentou menor valor de economia de energia, de 5,23%, no entanto, mostrou-se uma opção benéfica e de fácil aplicação, reduzindo o consumo para resfriamento em 5,41% e aquecimento em 1,5%.

Por outro lado, entre os casos analisados, os modelos com fachada dupla e maior PAF da camada interna (CR-9, CR-10 e CR-11) apresentaram os piores resultados em termos de desempenho energético, fomentando o consumo de energia em 40,36%, 39,83% e 39,43%, respectivamente, quando comparados ao CB. A maior área de vidro exposta à radiação solar combinada ao maior isolamento desta tipologia de fachada incrementaram a necessidade para resfriar o edifício em 41%. A demanda total de energia para climatização foi de 7,11kWh/m².ano, 7,09kWh/m².ano e 7,07kWh/m².ano para os casos CR-9, CR-10 e CR-11, sucessivamente, sendo que, desse total, as parcelas para resfriamento foram de 6,89kWh/m².ano, 6,86kWh/m².ano e 6,84kWh/m².ano, contra apenas 0,22kWh/m².ano para aquecimento.

O caso CR-6, com fachada cortina, aumentou a demanda energética em mais de 28%. Esta tipologia construtiva impulsionou o aumento do consumo para resfriamento em mais de 30% em comparação ao CB, em função do maior PAF e do consequente aumento do ingresso da radiação solar direta.

Os casos com fachada dupla com menor PAF e camada interna revestida por vidro (CR-3A, CR-4A e CR-5A) também comprometeram o desempenho energético

do edifício em mais de 6,17%, 9,46% e 9,18%, respectivamente, quando comparados ao CB. Neste caso, o revestimento envidraçado da camada interna combinado à pele extra de vidro aumentou o isolamento desta fachada, favorecendo a ocorrência do efeito estufa.

A aplicação do vidro como revestimento na camada interna eliminou os benefícios do uso da fachada dupla, situação que pode ser observada pela comparação entre os casos CR-3A e 3B, CR-4A e 4B, assim como CR-5A e 5B, que apresentam mesma configuração de fachada, com variação apenas na constituição da camada interna.

É importante observar que os casos com fachada dupla CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B se mostraram mais vantajosos para a redução do consumo de energia do que o caso CR-6, com fachada cortina, ao passo que a adoção de uma pele adicional de vidro aliada ao maior PAF da camada interna, casos CR-9, CR-10 e CR-11, piorou o desempenho termoenergético do edifício.

4.1.1 Desempenho termoenergético dos casos com fachada dupla ventilada

Na Figura 62, são apresentados os resultados de consumo de energia para climatização artificial específicos dos casos com fachada dupla. Estas análises se fizeram necessárias, pois permitiram compreender a influência da cavidade ventilada e suas variações de profundidade no desempenho energético do edifício.

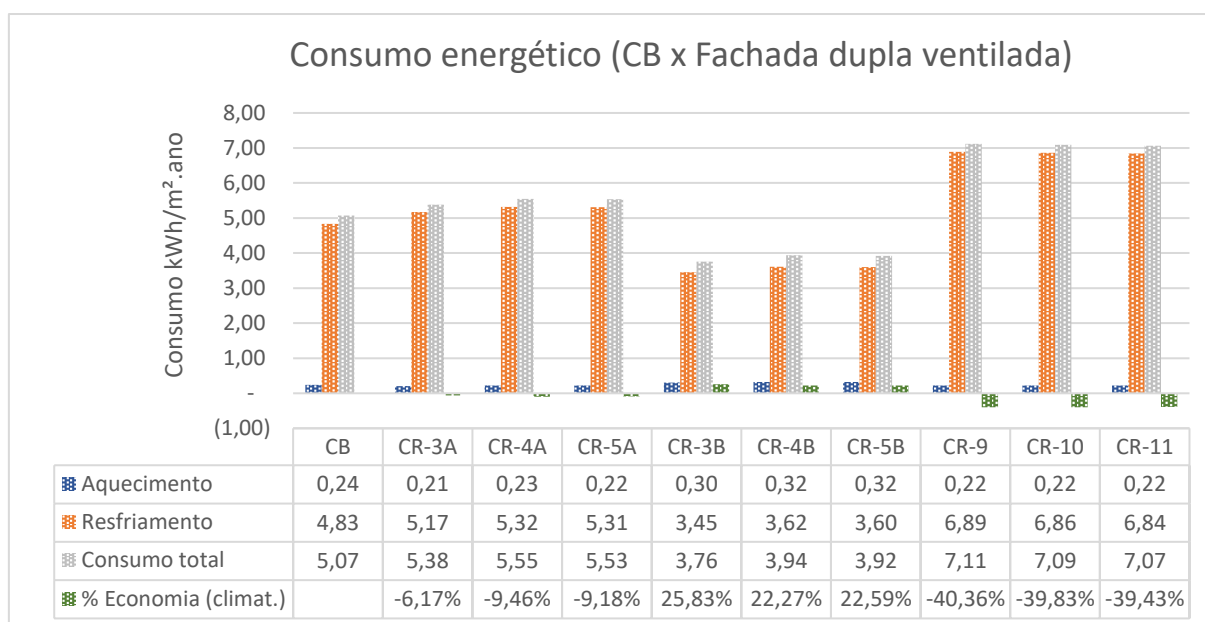


Figura 62 - Gráfico de desempenho termoenergético (CB x Fachada dupla ventilada) em kWh/m².ano
Fonte: AUTORA, 2021

Notou-se, por meio dos resultados das avaliações das diferentes configurações de fachada dupla, que a mesma é altamente influenciada pela constituição da camada interna, sendo que o PAF e a presença ou não do revestimento de vidro interferiram diretamente nos seus resultados de consumo energético, enquanto a profundidade da cavidade apresentou maior impacto nos casos com menor PAF.

Sendo assim, verificou-se que a inclusão de uma pele extra de vidro separada do edifício por uma cavidade ventilada se mostrou mais eficaz quando combinada à camada interna com menor área de abertura. Como já era esperado, o aumento do PAF da camada interna piorou o desempenho energético do edifício, devido à maior área de vidro exposta à incidência solar, condição que pode ser observada quando comparados os resultados obtidos entre os casos CR-3A e CR-9, CR-4A e CR-10 e CR-5A e CR-11, que apresentam mesma configuração, com PAF distintos. Os casos com maior PAF apresentaram aumento no consumo final de energia de 32,15%, 27,74% e 27,84%, respectivamente, quando comparados aos de menor PAF.

A contribuição do PAF da camada interna no aumento do consumo em fachadas duplas corrobora os resultados encontrados por Khalifa *et al.* (2017).

Em relação à presença de revestimento de vidro na camada interna, foi observado que a sua manutenção pode prejudicar o desempenho energético da edificação, contribuindo para o superaquecimento dos espaços internos devido ao aumento do isolamento da fachada, favorecendo, por consequência, o efeito estufa. Por outro lado, a ausência do revestimento trouxe benefícios em termos de eficiência energética ao melhorar a performance térmica do edifício em 43,08%, 40,86% e 41,07%, quando comparados os casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B, respectivamente.

O aumento do isolamento em edifícios com alta carga térmica interna pode ser um fator prejudicial, pois é capaz de limitar a dissipação de calor do ambiente interno para o externo, contribuindo para o aumento do consumo para resfriamento. Esta condição já foi investigada por Andreis *et al.* (2014), De Oliveira e Marques (2017) e Brugnera (2018).

Quanto ao comportamento da cavidade ventilada, a mesma foi avaliada com diferentes profundidades (0,60m, 0,80m e 1,00m). Os resultados apontaram que profundidades menores apresentaram maior eficácia nos casos em que a camada interna apresenta menor PAF (CR-3A e 3B, CR-4A e 4B, CR-5A e 5B). Por outro lado, nos casos com maior PAF, a maior profundidade de cavidade foi mais eficiente, uma

vez que a maior distância da fachada filtrou parte da radiação solar que chegaria no interior do edifício. No entanto, as diferentes profundidades não apresentaram impacto considerável na demanda de energia considerando-se o contexto analisado.

Dentro do cenário abordado, a cavidade de 0,60m apresentou o maior percentual de economia de energia para ar-condicionado, 25,83%, considerando os casos CR-3B, CR-4B e CR-5B. Isso acontece porque em cavidades mais estreitas a velocidade do ar é acentuada, ao passo que, em cavidades maiores, a velocidade diminui e o fluxo de ar é mais turbulento, minimizando o efeito chaminé e permitindo maiores trocas de calor com os ambientes internos. Dessa maneira, quando o ar no interior da cavidade é resfriado pelo ar externo de menor temperatura, há dissipação dos ganhos de calor, limitando, consequentemente, as cargas térmicas para resfriamento da edificação.

Resultado semelhante foi encontrado por Alberto *et al.* (2017) que, a partir de uma análise CFD realizada para um dia de verão com alta temperatura, identificaram que em cavidades menores o fluxo de ar é laminar, ou seja, o ar se move em alta velocidade e com uma direção definida, enquanto em cavidades maiores o fluxo de ar é turbulento. Assim, em fachadas ventiladas com cortina de ar externa, o aumento da velocidade do fluxo de ar pela cavidade provoca uma redução na temperatura média do ar, minimizando os ganhos de calor.

As propriedades térmicas dos vidros que compõem uma fachada dupla também apresentam papel fundamental no seu desempenho, uma vez que impactam diretamente as transferências de calor e a velocidade do vento no interior da cavidade.

Em fachadas envidraçadas, a radiação solar é transmitida através do envidraçamento externo da fachada dupla, aquecendo o ar presente na cavidade ventilada. Dessa forma, devido ao efeito de fluatibilidade térmica, quando a temperatura externa é inferior a interna, o ar externo mais frio entra através das aberturas da cavidade fazendo com que o ar mais quente e leve suba e gere uma pressão negativa, puxando a ar de menor temperatura e contribuindo, assim, com melhores condições de conforto e redução do consumo de energia para resfriamento.

Neste sentido, pode-se observar que uso de um vidro simples com alta transmitância na camada externa da fachada dupla favoreceu o aquecimento interno da cavidade, que em contato com ar externo mais frio foi extraído com maior facilidade por efeito chaminé, minimizando a demanda energética para resfriamento. Essa condição pode ter contribuído para a melhor performance energética dos casos CR-

3B, 4B e 5B em comparação ao CB. Os mesmos benefícios não foram observados com a mesma intensidade nos demais casos com fachada dupla (CR-3A, 4A e 5A e CR-9, CR-10 e CR-11) devido à constituição das suas fachadas, que possuem maior isolamento proporcionado pelo revestimento de vidro na camada interna e maior PAF nos casos CR-9, CR-10 e CR-11.

4.2 Avaliações de desempenho lumínico

4.2.1 Autonomia de luz natural espacial (sDA)

As simulações de luz natural consideraram sDA igual a 300lux/50% como autônoma. Observou-se que a maioria dos casos analisados apresentaram sDA autônoma, no mínimo aceitável, como pode ser observado na Figura 63.

O caso CR-2, com fachada semi-cortina e vidro *low-e*, apresentou o maior índice de sDA autônoma, atingindo 100% do espaço, devido à maior transmitância visível (tvis) da fachada com este vidro, 61,6%, quando comparado aos demais casos, constituídos por vidro insulado absorvente cinza (vidro absorvente cinza + ar 13mm + vidro incolor), com tvis igual a 39,2%. Vale destacar que o uso do vidro *low-e* se mostrou mais satisfatório para o aproveitamento da iluminação natural do que o aumento do PAF da edificação combinado a um vidro de menor tvis, como pode ser observado no caso CR-6, com fachada cortina, em que a sDA foi alcançada em 96% do espaço, assim como nos casos com fachada dupla ventilada e maior PAF da camada interna, onde a sDA foi atingida em 90% do ambiente.

A fachada cortina, CR-6, proporcionou a segunda maior porcentagem, 96% de sDA autônoma, uma vez que possui maior área de exposição à luz natural. Em seguida, apareceram os casos com mesmo PAF e fachada dupla, CR-9, CR-10 e CR-11, com sDA de 90,3%, 90% e 89,6% respectivamente. Todos esses casos de referência estão dentro da faixa de sDA considerada preferencial pela IES LM 83-12 (IESNA, 2012).

O acréscimo de uma pele de vidro limitou o acesso à iluminação natural, todavia, não apresentou impacto significativo no seu aproveitamento, sendo que a profundidade da cavidade teve pouca interferência no aproveitamento lumínico.

Observou-se que a presença do peitoril no CB, com fachada semi-cortina, limitou o acesso à luz natural quando comparado ao caso CR-6 com maior PAF, entretanto, não o impediu de alcançar áreas favoráveis de sDA (300lux/50%), de 84,8%.

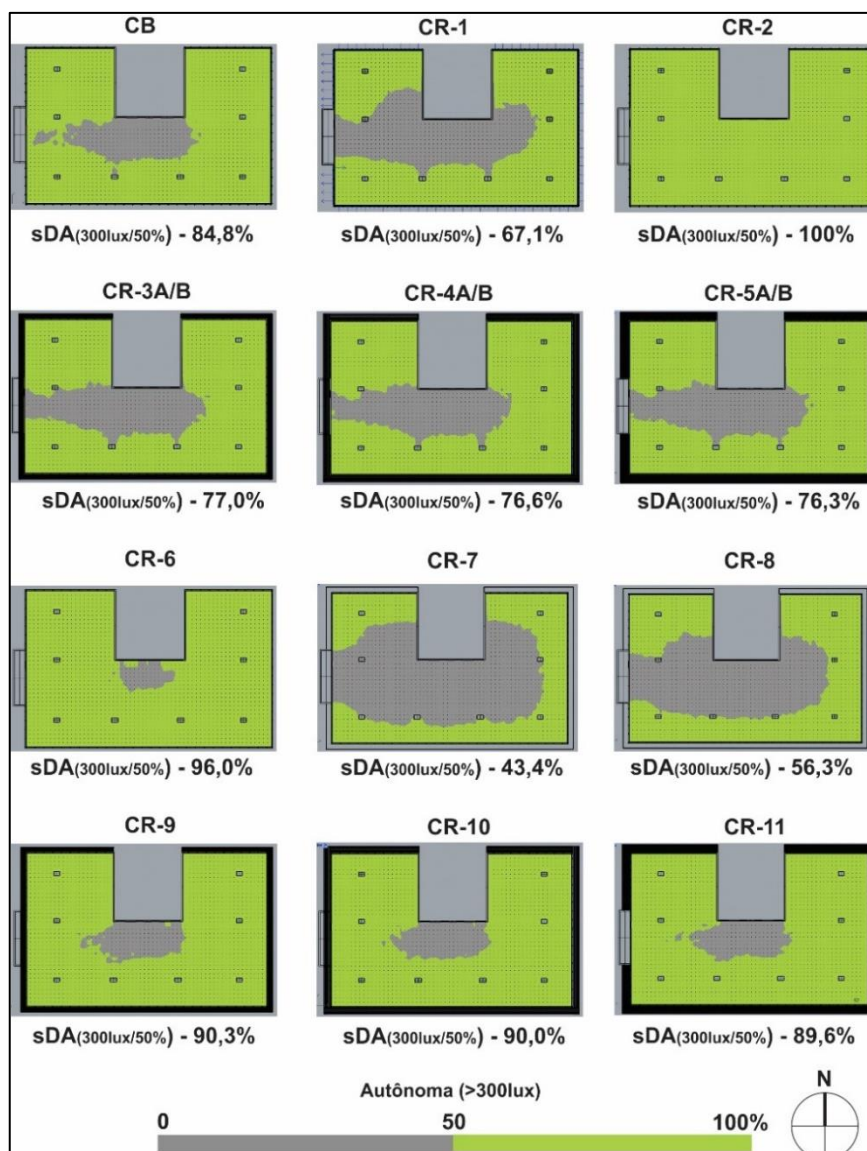


Figura 63 - Resultados das simulações de sDA, realizadas no software *Rhinoceros* com *plugin ClimateStudio*

Fonte: AUTORA, 2021

Já a combinação entre peitoril e pele adicional de vidro separados por uma câmara de ar, casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B, reduziu de 7,8% a 8,77%, dependendo da profundidade da cavidade ventilada, o acesso da luz natural em comparação ao CB, uma vez que o vidro extra funcionou como uma barreira, reduzindo a tvis da fachada de 39,2% para 34,8%.

Entre a menor e a maior cavidade houve uma redução de 0,97% do aproveitamento da luz natural, com sDA de 77%, 76,6% e 76,03%, para os casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B, sendo que a menor profundidade de cavidade apresentou maiores benefícios em termos de luz natural. No entanto, o impacto das profundidades maiores de cavidade não foi significativo.

O sombreamento das aberturas minimizou o acesso à luz do dia em todas as soluções analisadas, casos CR-1, CR-7 e CR-8, quando comparado ao CB, entretanto, apenas a solução com dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada com 25% de perfuração (CR-7) não garantiu níveis mínimos de sDA, 43,6%, valor abaixo de 55%, considerado aceitável pela IES LM 83-12 (IESNA, 2012).

O caso CR-1, com persiana, e o CR-8, com tela perfurada com 50% de perfuração, apresentaram sDA autônoma dentro do aceitável, 67,10% e 56,30% respectivamente. A diferença entre os casos com tela perfurada, CR-7 e CR-8, foi de 12,9% nos valores de sDA, no entanto, o caso com maior perfuração se mostrou mais vantajoso, estando dentro do limite considerado aceitável, ao passo que o de menor percentual de perfuração não alcançou a área mínima nos níveis de iluminância estipulados.

Notou-se que uma pele adicional de vidro (CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B) se mostrou mais benéfica em termos de desempenho lumínico do que a adição de uma persiana, com sDA 300lux/50% com porcentagens de área de 9,2% a 9,9% superior ao caso CR-1, considerando os cenários analisados.

4.2.2 Iluminância útil da luz natural (UDI)

Os valores de UDI que serão apresentados na sequência correspondem ao valor médio de UDI autônoma (300-3000lux) em toda área do ambiente analisado durante o período de funcionamento do edifício. Enquanto a sDA mede a suficiência de luz natural, a métrica UDI procura distinguir condições com excesso de brilho, que podem levar ao desconforto visual.

Os resultados das simulações de UDI apresentados na Figura 64 permitiram identificar que os casos CR-2 e CR-6 apresentaram os mais altos valores de UDI autônoma, 70,2% e 70,3%, respectivamente. Em contrapartida, esses mesmos casos também apresentaram as maiores áreas com UDI excessiva, superior a 3000lux, o que pode ser um indício da ocorrência de ofuscamento.

A presença de iluminâncias em excesso foi superior no caso CR-2, devido à maior tvis do vidro *low-e*, enquanto no caso CR-6 ela ocorreu em função do maior PAF dessa fachada. Dessa forma, notou-se que fachadas com maior PAF e baixa tvis apresentaram resultados de UDI autônoma semelhantes ao de fachadas com menor PAF e alta tvis, demonstrando a importância da escolha adequada do tipo de vidro,

uma vez que foi possível alcançar desempenhos semelhantes mesmo em PAF distintos, quando consideradas fachadas altamente envidraçadas.

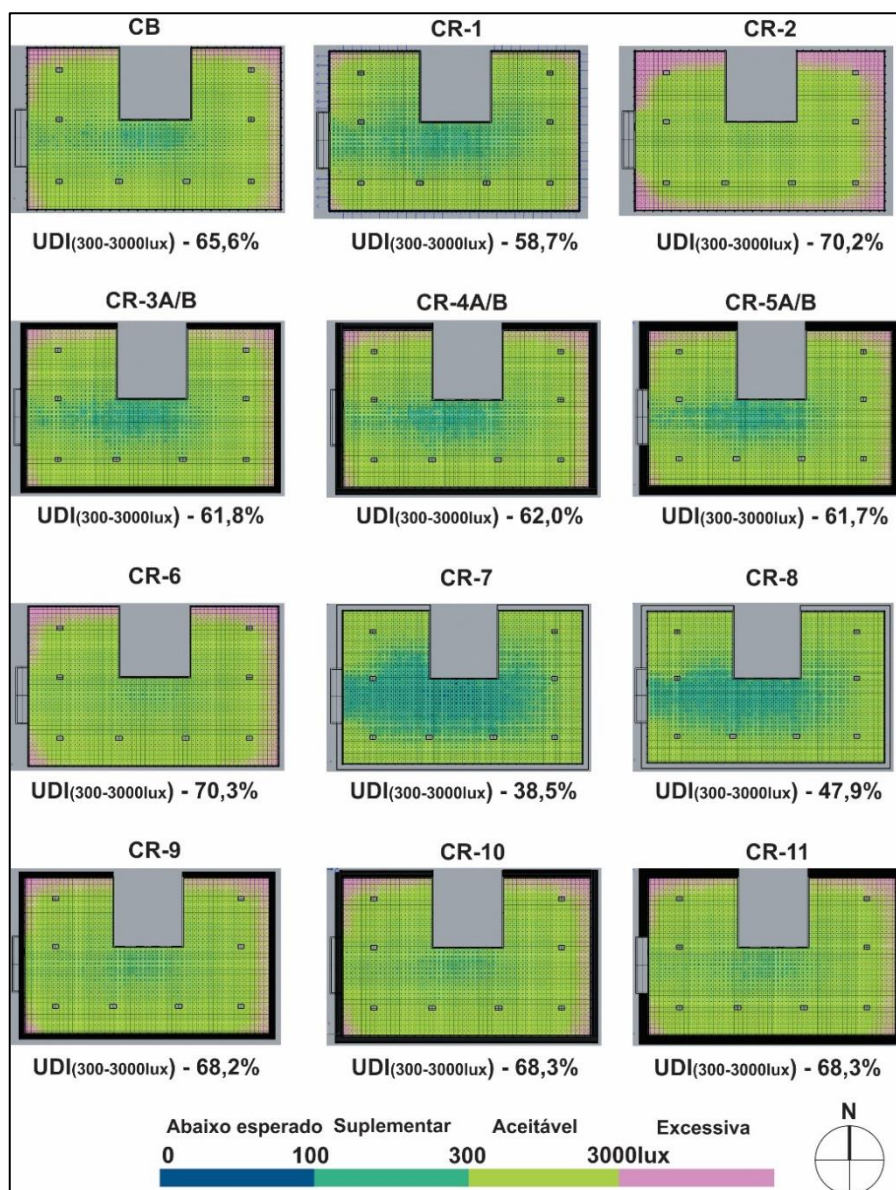


Figura 64 - Resultados das simulações de UDI (300-3000lux), realizadas no *software* Rhinoceros com *plugin ClimateStudio*
 Fonte: AUTORA, 2021

Os casos com fachada dupla e maior PAF da camada interna se mostraram favoráveis, atingindo UDI 300-3000lux em 68,2% da área do ambiente para o caso CR-9 e 68,3% para os casos CR-10 e CR-11. Como pode ser visto, as diferentes profundidades de cavidade não comprometeram o acesso lumínico. Por outro lado, quando comparado ao CR-6, com mesmo PAF (75%), o acréscimo da pele de vidro minimizou em aproximadamente 2% o acesso à luz natural; no entanto, a iluminância

excessiva, superior a 3000lux, também diminuiu, melhorando a qualidade da iluminação.

Esse fato demonstra que a camada extra de vidro pode limitar a incidência da radiação solar direta no interior do edifício, reduzindo o ofuscamento. Nestes casos, foram encontrados pontos com UDI suplementar apenas em áreas mais distantes das aberturas.

Condição semelhante foi encontrada nos casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B. Os mesmos apresentaram UDI de 300-3000lux de 61,8%, 62% e 61,7% respectivamente, apresentando uma redução do acesso à luz natural de aproximadamente 6,5%, quando comparados aos demais casos com fachada dupla, sendo observada uma extensão da área com UDI suplementar, em função da menor área de abertura combinada com a presença de uma camada extra de vidro. Em contrapartida, as iluminâncias excessivas também foram reduzidas, promovendo maior qualidade lumínica.

O CB apresentou UDI autônoma em 65,6% da área do ambiente. Por meio desse caso, foi possível identificar que o menor PAF (50%) reduziu em apenas 4,7% o aproveitamento lumínico, quando comparado ao caso CR-6, com PAF de 75%. Ambos os casos apresentaram área aproximada com iluminâncias em excesso, todavia, notou-se no CB um aumento da área com UDI suplementar, ainda que em pequena quantidade.

Quando o CB foi comparado aos casos CR-9, CR-10 e CR-11, verificou-se que o PAF apresentou maior influência no desempenho lumínico do que a adição de uma segunda camada de vidro à edificação. Nos casos com fachada dupla, percebeu-se um aumento da área com UDI suplementar, no entanto, este foi mais visível no CB de menor PAF.

Em relação aos casos com dispositivo de sombreamento, os mesmos sempre reduziram a área com iluminância útil, favorecendo a necessidade de complementação com iluminação artificial, condição comprovada com o aumento da UDI suplementar nos casos CR-1, CR-7 e CR-8.

Entre os casos com elementos de controle solar, a adição de uma persiana, CR-1, apresentou o menor impacto lumínico, com UDI autônoma de 58,7%. As simulações computacionais consideram a persiana automatizada, sendo fechada apenas em condições de ofuscamento.

O uso da persiana pode favorecer a qualidade da iluminação em espaços internos, entretanto, em termos lumínicos, seu uso é questionável, pois quando com abertura manual seu acionamento é dependente do usuário, enquanto tem seu uso discutido quando automatizada devido às dificuldades em se estabelecer um controle de funcionamento que não interfira no acesso à luz natural de qualidade.

Nesse sentido, o uso de dispositivos de sombreamento fixos pode ser vantajoso, podendo promover maior qualidade lumínica, se bem dimensionados. Essa situação foi observada nos casos CR-7 e CR-8, que eliminaram a ocorrência de problemas relacionados ao ofuscamento. Ambos os casos aumentaram a necessidade de iluminação artificial, no entanto, apenas o caso com menor perfuração da tela, CR-7, apresentou regiões com UDI abaixo do aceitável, apresentando pontos em que a iluminação artificial deve estar ligada todo o tempo.

4.2.3 Exposição a luz solar direta (ASE)

As avaliações de luz natural por intermédio da métrica ASE permitem predizer o desconforto visual dos usuários, uma vez que consideram a área de piso que apresenta excesso de iluminância, podendo levar a ocorrência de ofuscamento. Nesse contexto, são considerados espaços que recebem luz solar direta, iluminância maior do que 1000lux, por mais de 250 horas do tempo de ocupação (ASE 1000lux/250h).

Os resultados das simulações de ASE 1000lux/250h são apresentados na Figura 65. Nela é possível observar que a presença de iluminâncias excessivas se concentra em áreas próximas às aberturas, principalmente as voltadas para as orientações norte, leste e oeste que apresentam alta incidência de radiação solar direta.

Além disso, pode-se perceber que apenas os casos com tela perfurada (CR-7 e CR-8) apresentaram ASE 1000lux/250h considerada favorável, uma vez que barraram a incidência solar direta. Nos demais casos, a análise de ASE foi considerada insatisfatória, maior do que 10%, em áreas próximas às aberturas. Embora ocorram variações para cada caso analisado, as regiões com iluminâncias excessivas foram observadas em pontos afastados no máximo a 2,00m da fachada norte e a 1,50m nas fachadas leste e oeste. A fachada leste apresentou maior área com brilho em excesso se comparada a oeste, uma vez que a fachada oeste é parcialmente sombreada pelo volume da circulação vertical.

Vale destacar que a maior área envidraçada do edifício está voltada para a orientação solar sul, o que beneficia a qualidade da iluminação ao apresentar possibilidades reduzidas de ofuscamento.

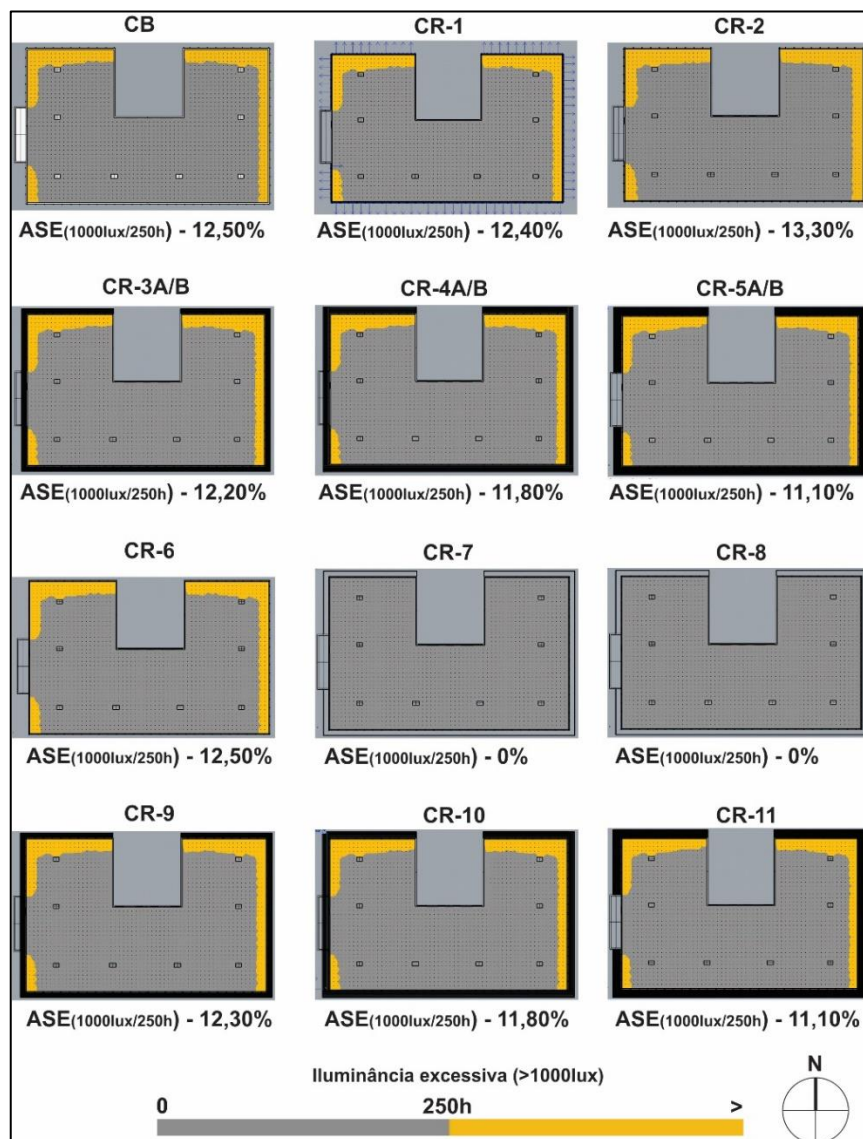


Figura 65 - Resultados das simulações de ASE (1000lux/250h), realizadas no *software* Rhinoceros com *plugin* ClimateStudio

Fonte: AUTORA, 2021

Entre os casos analisados, o caso CR-2 apresentou a maior incidência de radiação solar direta, ASE 1000lux/250h em 13,30% da área analisada, devido à maior tvis do vidro utilizado (vidro *low-e* + ar 13mm + vidro incolor), 61,6%. Esta situação pode ser identificada comparando-se os dados do caso CR-2 com o CB, que possui a mesma tipologia de fachada, semi-cortina, e vidro distinto, com tvis de 39,2%. O CB, apresentou 0,8% menos exposição à luz solar direta, devido às diferentes tvis dos vidros.

O CB e o caso CR-6 apresentaram o segundo maior percentual de ASE 1000lux/250h. Por meio da análise desses casos, foi possível perceber que a variação do PAF, de 50% para 75%, não interferiu na presença de luz solar direta, uma vez que os resultados de ASE 1000lux/250h foram de 12,50% em ambos os casos.

O caso de referência CR-1 apresenta a mesma configuração do CB, porém com a adição de persianas às janelas. Nesse caso, foram identificadas iluminâncias excessivas em 12,40% da área do ambiente, valor semelhante ao encontrado no CB, com 12,50%. Isso aconteceu, pois, a métrica ASE é calculada considerando o dispositivo de sombreamento totalmente aberto ao longo do ano.

Já os casos com fachada dupla ventilada, CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B, com camada interna com PAF de 50%, apresentaram ASE 1000lux/250h em 12,20%, 11,8% e 11,1% respectivamente, enquanto os casos CR-9, CR-10 e CR-11 com PAF de 75%, apresentaram ASE 1000lux/250h em 12,30%, 11,8% e 11,8% da área avaliada. Como pode ser observado, não houve variação considerável nos valores de ASE 1000lux/250h, quando comparados casos com mesma profundidade de cavidade. Da mesma forma, nos casos com fachada semi-cortina e cortina, CB e CR-6, a redução do PAF não minimizou a exposição à luz solar direta, considerando a mesma tvis dos vidros da fachada.

A avaliação dos casos com fachada dupla demonstrou que uma pele extra de vidro é capaz de reduzir os níveis de ASE 1000lux/250h, quando comparados aos casos sem a camada de vidro adicional. Além disso, observou-se que quanto maior a profundidade da cavidade, menor a exposição à luz solar direta, já que a tvis da fachada é reduzida, além do vidro extra funcionar como uma relativa barreira contra a radiação solar direta.

4.2.4 Daylight glare probability (DGP)

Os resultados das análises de DGP são apresentados em sDG (*spatial disturbing glare* ou ofuscamento perturbador espacial), que representa a porcentagem de visuais, em toda área de piso ocupada, em que o usuário experimenta vistas com brilho perturbador ou intolerável ($DGP > 40\%$) por ao menos 5% do tempo de ocupação.

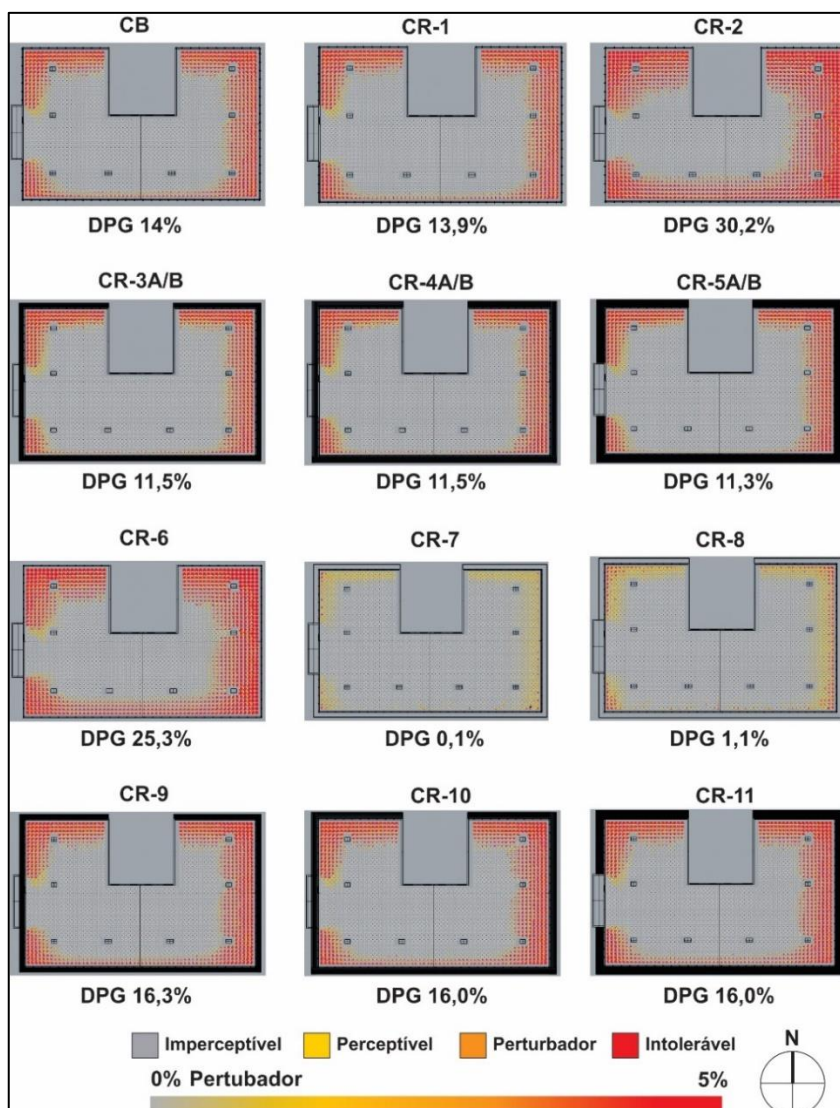


Figura 66 - Resultados das simulações de DGP, realizadas no *software* Rhinoceros com *plugin* *ClimateStudio*
 Fonte: AUTORA, 2021

Por meio dos resultados das simulações computacionais de DGP contidos na Figura 66, pode-se observar que o caso CR-2 apresentou a maior porcentagem de visuais com brilho perturbador, 30,2%, provavelmente devido à maior *tvis* do vidro *low-e*. Nesse caso, pode-se dizer que o aumento da *tvis* do vidro prejudicou a qualidade da iluminação no espaço, ao criar condições para o aumento do ofuscamento.

Na sequência, aparece o caso CR-6, com fachada cortina, com DGP de 25,3%, sendo esse o caso com maior área de exposição à radiação solar direta. Assim como os resultados das simulações de ASE 1000lux/250h já haviam demonstrado, identificou-se que a *tvis* do vidro apresentou maior influência na incidência solar direta e, conseqüentemente, na ocorrência de ofuscamento do que o aumento do PAF, considerando um vidro com *tvis* mais baixa. Esse fato pode ser demonstrado

comparando-se os casos CR-2 com PAF de 50% e tvis de 61,6% e CR-6 com PAF de 75% e tvis de 39,2%.

Os casos CR-9, CR-10 e CR-11, possuem fachada dupla ventilada e PAF da camada interna igual ao do caso CR-6, todavia, apresentaram menor porcentagem de visuais com brilho perturbador ou intolerável, sendo os valores de DGP de 16,3% para o caso CR-9 e de 16% para os casos CR-10 e CR-11, valor 9% menor do que o caso com fachada cortina. Isso se deveu à presença da pele de vidro adicional, que filtra parcialmente direta, além de minimizar a tvis da fachada de 39,2% para 34,8%.

Quando comparados os casos com fachada cortina (CR-6) e semi-cortina (CB) pode-se constatar a interferência do PAF na ocorrência de ofuscamento. O CB com PAF de 50%, devido à presença do peitoril, apresentou 11% menos DGP do que o CR-6, com 25,3%.

Nas simulações de DGP, não é possível verificar o quanto a inclusão da persiana (CR-1) pode minimizar o ofuscamento, uma vez que o cálculo de DGP não considera sistemas de sombreamento dinâmicos, ou seja, a persiana é considerada aberta o tempo todo. Em função disso, os resultados de DGP do caso CR-1 foram muito semelhantes ao do CB, com valor de 13,9%.

Conforme o esperado, a adição de uma pele de vidro ao CB favoreceu a qualidade da iluminação, quando observados os resultados dos casos CR-3A/B, CR-4A/B e CR-5A/B. Vale ressaltar que o acesso à iluminação natural diminuiu nesses casos, mas a qualidade da iluminação melhorou.

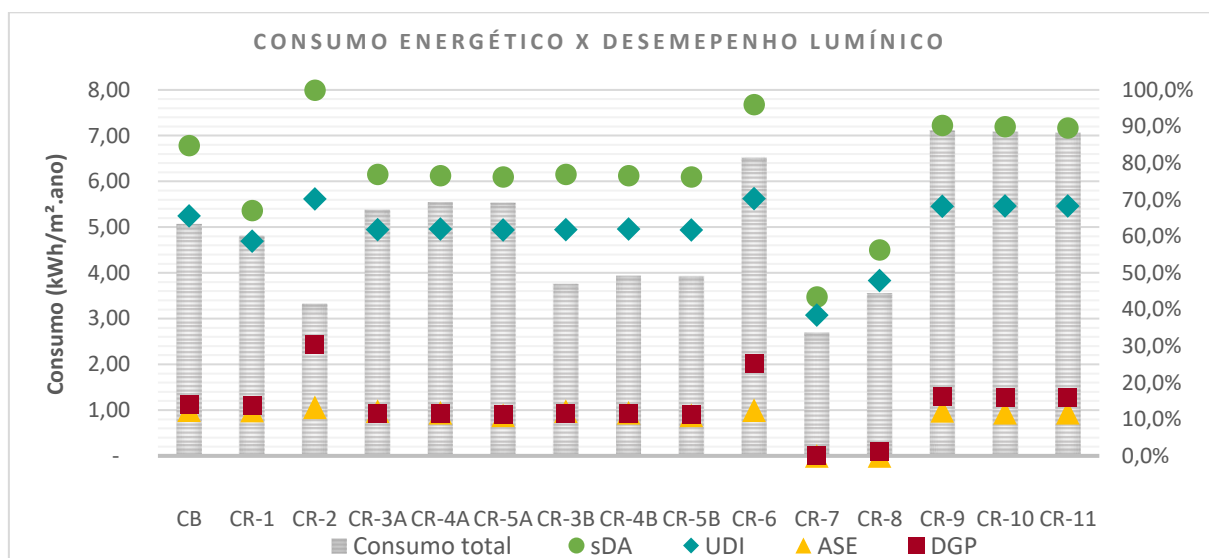
Entre os casos com fachada dupla, identificou-se que quanto maior o PAF da camada interna, maior a porcentagem de visuais no espaço interno em que os ocupantes sofrem com brilhos excessivos, em uma diferença de aproximadamente 5% entre os casos CR-3A/B, CR- 4A/B e CR-5A/B (PAF 50%) e CR-9, CR-10 e CR-11(PAF 75%).

Observou-se que diferentes profundidades de cavidade interferiram na ocorrência de ofuscamento, sendo que quanto mais profunda, menores as porcentagens de DGP. No entanto, essa diferença é irrelevante, de 0,2% a 0,3%, dependendo dos casos analisados.

Os casos com dispositivos de sombreamento fixos, CR-7 e CR-8, praticamente eliminaram a ocorrência de ofuscamento no espaço analisado, com DPG de 0,1% e 1,1% respectivamente, mostrando-se benéficos, se bem dimensionados, em edifícios de escritórios onde brilhos em excesso são indesejados.

4.3 Desempenho lumínico x termoenergético

Os resultados de desempenho lumínico e termoenergético de forma combinada, considerando as diferentes tipologias de fachadas envidraçadas analisadas, são apresentados na Figura 67. Para a determinação da configuração de fachada ideal para a ZB2, buscou-se o cenário com baixo consumo de energia para ar-condicionado, combinado a amplo acesso à luz natural e a baixos índices de ofuscamento.



	CB	CR-1	CR-2	CR-3A	CR-4A	CR-5A	CR-3B	CR-4B	CR-5B	CR-6	CR-7	CR-8	CR-9	CR-10	CR-11
Consumo total (kWh/m².ano)	5,07	4,80	3,32	5,38	5,55	5,53	3,76	3,94	3,92	6,52	2,69	3,56	7,11	7,09	7,07
sDA (%)	84,8	67,1	100,0	77,0	76,6	76,3	77,0	76,6	76,3	96,0	43,4	56,3	90,3	90,0	89,6
UDI (%)	65,6	58,7	70,2	61,8	62,0	61,7	61,8	62,0	61,7	70,3	38,5	47,9	68,2	68,3	68,3
ASE (%)	12,5	12,4	13,3	12,2	11,8	11,1	12,2	11,8	11,1	12,5	0,0	0,0	12,3	11,8	11,8
DGP (%)	14,0	13,9	30,3	11,5	11,5	11,3	11,5	11,5	11,3	25,3	0,1	1,1	16,3	16,0	16,0

Figura 67 - Gráfico e quadro de desempenho termoenergético x desempenho lumínico

Fonte: AUTORA, 2021

Considerando o contexto analisado, pode-se perceber que os casos com fachada dupla, em que a camada interna corresponde a uma fachada tradicional, CR-3B, CR-4B e CR-5B, estão entre as melhores soluções de fachada para ZB2, mostrando-se vantajosas para o equilíbrio entre o aproveitamento da iluminação natural e o consumo para condicionamento artificial, quando comparados ao CB. A adição de uma pele de vidro separada da edificação por uma cavidade ventilada favoreceu o desempenho energético do edifício em mais de 25%, considerando a melhor situação (CR-3B), reduzindo o consumo para resfriamento em mais de 28%, além de limitar problemas relacionados ao ofuscamento.

A menor profundidade de cavidade, 0,60m, apresentou o melhor desempenho termoenergético, de 3,76kWh/m².ano, com sDA de 300lux/50% considerado favorável, alcançando 77% da área do ambiente e UDI de 300-3000lux em 61,8%. Em relação às avaliações que consideraram a exposição à luz solar direta, os valores de ASE ultrapassaram em 2% o limite aceitável, no entanto, as iluminâncias excessivas foram encontradas em pontos afastados no máximo 2,5m das aberturas, principalmente as voltadas para as orientações norte, leste e oeste, enquanto as avaliações de DGP indicaram apenas 11% das vistas com brilho perturbador ou intolerável.

Nestes casos, a eliminação do revestimento de vidro da camada interna foi indispensável para a melhora do desempenho termoenergético, ao permitir uma maior dissipação de calor, proveniente da alta carga térmica interna em edifícios comerciais.

O caso CR-8, com fachada cortina e acréscimo de dispositivo de sombreamento do tipo tela perfurada com 50% de perfuração, garantiu uma das melhores equidades entre os desempenhos lumínico e termoenergético. O mesmo apresentou consumo de 3,56kWh/m².ano, com sDA de 300lux/50% em 56,3% da área analisada, percentual dentro do limite considerado aceitável pela IES LM 83 (IESNA, 2012) e UDI de 47,9%.

Além disso, no que diz respeito às análises que consideram a presença de iluminâncias excessivas, a presença da tela perfurada praticamente eliminou a sua ocorrência, sendo as avaliações de ASE igual a 0% e DGP de 1,1%, um indício de que a possibilidade de ofuscamento é praticamente nula em todo período de ocupação do escritório, favorecendo o conforto visual dos ocupantes.

Vale ressaltar que o mesmo não aconteceu com o caso CR-7, que possui a mesma configuração, porém com menor área de perfuração da tela, 25%. Esse caso foi responsável pelo menor consumo energético para climatização do edifício, 2,69kWh/m².ano, uma vez que a tela funcionou como um filtro contra a radiação solar direta, minimizando o consumo para ar-condicionado em mais de 46%, quando comparado ao CB. Esse fato pode ser comprovado pelas simulações de ASE e DGP, com valores de 0% e 0,1%, respectivamente. Embora tenha apresentado o melhor desempenho termoenergético, o caso CR-7 não garantiu níveis adequados de luz natural, com sDA de 300lux/50% de 43,4%, valor abaixo do desejável e UDI 300-3000lux em apenas 38,5% da área do ambiente, contribuindo, provavelmente, para o aumento do consumo para iluminação artificial, sendo considerado, dentro do contexto analisado, inadequado para a ZB2.

Esses resultados reforçam os já encontrados por Chi, Moreno e Navarro (2018), que identificaram que em fachadas envidraçadas, o uso da tela perfurada é capaz de promover maior qualidade lumínica, além de reduzir o consumo energético do edifício, sobretudo a carga térmica para resfriamento. Para os autores, embora a tela sempre reduza os ganhos de calor por irradiação, nem todas as configurações promovem níveis suficientes de luz natural, condição corroborada por análises dos diferentes percentuais de perfuração considerados neste trabalho, 25% e 50%.

Resultados semelhantes foram encontrados por Lavin e Fiorito (2017), em que um modelo otimizado de tela perfurada (50% de abertura) garantiu maiores índices de UDI autônoma, combinada a baixos valores de DGP e consumo energético. A tela de 50% foi considerada semitransparente ao olho humano, contribuindo, também, no contato visual com o exterior.

O caso de referência CR-2, com fachada semi-cortina e vidro *low-e*, apresentou o segundo mais baixo consumo para climatização artificial, 3,32kWh/m².ano e os mais altos níveis de iluminação natural entre todos os casos analisados, com sDA de 100% e UDI de 70,2%. Isso aconteceu pois o vidro *low-e* é capaz de restringir a transmissão de calor para o espaço interno, reduzindo, por consequência, a carga térmica interna, além da constituição dos vidros dessa tipologia apresentar alta *tvis*, 61,6%, o que contribui para o maior aproveitamento da luz natural.

Todavia, é importante observar que a maior transmitância visível desse vidro também contribuiu para que o mesmo apresentasse os maiores índices de exposição à luz solar direta (ASE), 13,3% e vistas com brilho perturbador ou intolerável (DGP) em 30,2% da área analisada, percentual mais alto do que o encontrado em casos com maior PAF e menor *tvis* dos vidros.

Estes resultados coincidem com os encontrados por Liu *et al.* (2021) e Pereira (2017), que identificaram que quanto maior a *tvis* de um vidro, maiores as possibilidades de ofuscamento. Além disso, de acordo com Andreis *et al.* (2014), embora o PAF possa interferir nos resultados de consumo, o tipo adequado do vidro pode favorecer o desempenho da edificação.

Quando comparados os casos CR-8 e CR-2, o caso com fachada semi-cortina e vidro *low-e* apresentou a maior equidade entre consumo para climatização e iluminação natural, entretanto, aumentou o desconforto visual, o que pode contribuir para que os usuários interfiram no edifício por meio do sombreamento das aberturas, incrementando, por consequência, o consumo para iluminação artificial. Felipe

(2016) verificou que dispositivos de sombreamento apresentam desempenho superior aos vidros de controle solar, proporcionando melhores condições de iluminação e ganho solar.

Entre os casos analisados com fachada semi-cortina, a configuração com vidro *low-e* (CR-2) se destacou em todas as situações, considerando o consumo para climatização e acesso à luz natural. Quando comparados seus dados aos do CB, que possui mesma configuração, porém com vidro insulado absorvente cinza (tvis de 39,2%), permite uma observação importante sobre a influência do tipo de vidro nos desempenhos lumínico e termoenergético do edifício. Em termos de climatização, o vidro *low-e* reduziu o consumo de 5,07kWh/m².ano do CB para 3,32kWh/m².ano, além de aumentar a autonomia de luz natural. Nesse caso, vale destacar que o CB já apresentava níveis favoráveis de sDA 300lux/50% e UDI 300-3000lux, 84,8% e 65,6%, respectivamente.

O caso CR-2, minimizou em aproximadamente 34,5% o consumo para climatização, comparado ao CB. No entanto, o vidro absorvente cinza proporcionou melhores condições de iluminação, com DPG de 14%, contra 30,2% do caso CR-2. Essa situação demonstra o quão complexas podem ser as avaliações de desempenho lumínico e termoenergético de forma integrada, visto que o CR-2 promoveu o maior equilíbrio entre o acesso à luz natural e o baixo consumo para ar-condicionado. Apesar disso, a elevada possibilidade de ofuscamento nessa configuração reduziu a qualidade da iluminação, interferindo no conforto visual dos usuários. Dessa forma, a inclusão de dispositivos de sombreamento fixos bem dimensionados ou de persianas operadas corretamente poderia proporcionar melhores resultados nessa tipologia de fachada.

A adição de persianas às janelas do CB reduziu o consumo para ar-condicionado em 5,23% e manteve o acesso à iluminação natural dentro do aceitável, com sDA de 67,1%. Nesse caso, vale destacar que as simulações de sDA consideram o sombreamento dinâmico, ou seja, as persianas são consideradas automatizadas, sendo fechadas apenas em condições de ofuscamento. Esse resultado poderia ser diferente se as persianas apresentassem fechamento mecânico, dependente da interferência do usuário.

A persiana reduziu em 22,64% os percentuais de sDA e em 12,5% a UDI, quando comparada ao CB. Em relação às avaliações de ASE e DPG, a persiana é considerada aberta, não havendo variação significativa entre ambos os casos,

entretanto, se utilizadas persianas controladas para acionamento apenas em casos de ofuscamento, o mesmo poderia ser eliminado sem maiores prejuízos aos níveis de iluminação, já que permanece dentro do aceitável.

Em relação aos demais casos analisados, CR-3A, CR-4A, CR-5A, CR-6, CR-9, CR-10 e CR-11, todos atenderam aos critérios lumínicos de sDA e UDI, entretanto, fomentaram o consumo para climatização artificial, quando comparados ao CB. Os casos com maior PAF ainda propiciaram um aumento nas condições de ofuscamento, apresentando altas discrepâncias entre o aproveitamento da iluminação natural e o consumo de energia.

Portanto, como pode ser identificado por meio dos resultados apresentados, a combinação entre diferentes parâmetros, como o tipo de fachada, a escolha do vidro, o PAF, além da presença ou não de dispositivos de sombreamento, pode influenciar diretamente no equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético em fachadas envidraçadas para a ZB2. Dessa forma, para o contexto analisado, observou-se que:

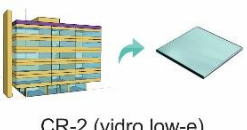
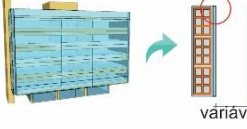
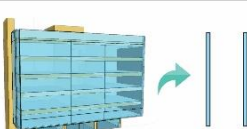
a) fachadas semi-cortina com adição de persianas (CR-1) e com vidro *low-e* (CR-2), além de fachadas dupla ventilada (CR-3B/4B/5B), beneficiam o equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético do edifício ao reduzir o consumo de energia e favorecer a qualidade da iluminação;

b) vidros de controle solar se mostraram vantajosos, aumentando o acesso à luz natural e a redução do consumo para climatização. No entanto, pioraram o conforto visual dos usuários, ao fomentar o ofuscamento, sendo necessário o sombreamento adequado das aberturas para melhores resultados;

c) o aumento do PAF sempre favoreceu o aumento no consumo de energia e a presença de iluminâncias excessivas. Diante disso, os casos com fachada cortina, CR-6, e fachada dupla com PAF de 75%, CR-9, CR-10, e CR-11, mostraram-se inadequados para a ZB2;

d) dispositivos de sombreamento favoreceram o desempenho termoenergético. A automatização da persiana (CR-1) e a tela com 50% de perfuração (CR-8), conseguiram equilibrar qualidade lumínica e baixo consumo para ar-condicionado. Entretanto, o caso CR-7 foi desfavorável em termos lumínicos.

A Figura 68 sintetiza, de forma geral e esquemática, os principais resultados encontrados neste trabalho:

CASO BASE	 Caso Base Fachada semi-cortina (PAF de 50%) Vidro esquadria: (absorvente cinza 6mm + ar 13mm + vidro incolor 6mm) Revestimento de vidro absorvente cinza 6mm Consumo AC = 5,07 kWh/m².ano sDA= 84,8% UDI= 65,8% ASE = 12,5% DGP= 14%	
CB x CR-1 FSC + persiana	 CR-1 (Persiana) ↓ Menor consumo AC ↓ Menor acesso a luz natural / dentro do aceitável ↓ Menor Ofuscamento *Para sistema de controle automatizado	✓
CB x CR-2 FSC + vidro low-e	 CR-2 (vidro low-e) ↓ Menor consumo ↑ Maior acesso a luz natural ↑ Maior Ofuscamento Necessário sombreamento adequado das aberturas, para melhores resultados	✓
CBxCR-3A/4A/5A FDV (PAF 50%)	 CR-3A/4A/5A ↑ Maior consumo AC ↓ Menor acesso a luz natural / dentro do favorável ↓ Menor Ofuscamento	✗
CBxCR-3B/4B/5B FDV (PAF 50%)	 CR-3B/4B/5B ↓ Menor consumo AC ↓ Menor acesso a luz natural / dentro do favorável ↓ Menor Ofuscamento	✓
CB x CR-6 FC (PAF 75%)	 CR-6 ↑ Maior consumo AC ↑ Maior acesso a luz natural ↑ Maior Ofuscamento	✗
CB x CR-7 FC + TP	 CR-7 ↓ Menor consumo AC ↓ Menor acesso a luz natural / inadequado ↓ Menor Ofuscamento	✗
CB x CR-8 FC + TP	 CR-8 ↓ Menor consumo AC ↓ Menor acesso a luz natural / dentro do aceitável ↓ Menor Ofuscamento	✓
CB x CR-9/10/11 FDV (PAF 75%)	 CR-9/10/11 ↑ Maior consumo AC ↑ Maior acesso a luz natural ↑ Maior Ofuscamento	✗

CB = Caso Base; AC = ar-condicionado; FSC = fachada semi-cortina; FC = fachada cortina; FDV = fachada dupla ventilada; TP = tela perfura.

Figura 68 - Resumo esquemático dos principais parâmetros que influenciam no equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético

Fonte: AUTORA, 2022

5 Conclusão

Este trabalho avaliou os desempenhos lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas aplicadas em um modelo de edifício comercial, no sul do Brasil, especificamente na ZB2. Por meio de simulação computacional dinâmica, um estudo de caso foi avaliado, sendo possível identificar os principais parâmetros que interferem no desempenho de fachadas envidraçadas, com o intuito de encontrar o equilíbrio entre o acesso à iluminação natural de qualidade combinado ao baixo consumo de energia para climatização artificial.

O edifício escolhido como objeto do estudo de caso é um edifício comercial, localizado na região central da cidade de Pelotas-RS, projetado pelo arquiteto Ari Marangon e construído em 1979. O mesmo possui fachada semi-cortina e planta livre, características comumente encontradas na arquitetura corporativa contemporânea.

Esse edifício deu origem ao Caso Base, parâmetro de comparação nas avaliações realizadas. Configurações distintas de fachadas envidraçadas, representadas pelos Casos de Referência, foram avaliadas com: i) substituição de vidro absorvente por vidro *low-e*; ii) adição de persiana entre vidros ou tela com diferentes percentuais de perfuração; iii) fachada cortina; e iv) fachadas duplas ventiladas naturalmente, com diferentes constituições da camada interna, distintos percentuais de abertura de fachada (PAF) e profundidades de cavidades variadas.

Os resultados desta pesquisa indicaram a presença de diversos cenários que podem promover um melhor equilíbrio entre os desempenhos lumínico e termoenergético, considerando diferentes tipologias de fachadas envidraçadas para a ZB2.

No contexto analisado, fachadas duplas ventiladas naturalmente podem beneficiar os desempenhos lumínico e termoenergético do edifício, dependendo da configuração da sua camada interna e das características da cavidade ventilada, garantindo níveis adequados de iluminação natural com baixa demanda energética para condicionamento do edifício.

O PAF e a presença ou não do revestimento de vidro sob os elementos opacos da camada interna se mostraram fatores fundamentais para o desempenho de fachadas duplas. Além disso, observou-se que uma pele extra de vidro apresentou potencial para a melhora da qualidade da iluminação, ao permitir acesso à luz natural e limitar a ocorrência de ofuscamento.

Assim, uma fachada dupla, em que a camada interna com PAF de 50%, correspondente a uma fachada tradicional (vidro apenas nas aberturas da camada interna), pode reduzir a demanda energética do edifício de forma significativa, entre 22% e 25%, dependendo da profundidade da cavidade, quando comparada com uma fachada semi-cortina. A presença da cavidade ventilada contribuiu para a redução das trocas de calor entre o ambiente interno e externo, minimizando a carga térmica para resfriamento da edificação.

Quanto às diferentes profundidades de cavidade analisadas nas fachadas duplas (0,60m, 0,80m e 1,00m), identificou-se que as mesmas influenciaram o desempenho energético do edifício apenas nos casos com menor PAF da camada interna. A menor profundidade de cavidade se destacou ao acentuar a ocorrência do efeito chaminé, reduzindo, dessa forma, as trocas térmicas entre os ambientes interno e externo.

Nos casos com fachada dupla e maior PAF da camada interna, as diferentes profundidades da cavidade não impactaram de maneira significativa no seu desempenho, ao passo que a presença do revestimento de vidro na camada interna piorou o desempenho do edifício, superaquecendo o espaço interno e, conseqüentemente, demandando maior energia para climatização.

Em relação ao desempenho lumínico, todos os casos analisados com fachada dupla se mostraram vantajosos para o maior aproveitamento da iluminação natural, sendo que a camada adicional de vidro conseguiu limitar o ofuscamento ao reduzir em 2,5% e 9,3% nos casos com menor e maior PAF da camada interna, respectivamente, quando comparado aos casos sem fachada dupla e PAF semelhante.

Concluiu-se que, no contexto dessa investigação, a camada de vidro extra de uma fachada dupla pode ser mais eficaz para a melhora da qualidade da iluminação do que a adição de uma persiana, considerando a necessidade de interferência dos usuários para seu acionamento e as dificuldades em estabelecer um sistema de controle que a acione apenas em condições de ofuscamento, sem comprometimento do acesso à iluminação natural.

Em relação aos casos com dispositivo de sombreamento fixo, identificou-se que uma fachada cortina combinada a uma tela com percentual de perfuração de 50% é capaz de melhorar o desempenho termoenergético do edifício, além de proporcionar níveis aceitáveis de iluminação natural com menores possibilidades de ofuscamento.

Verificou-se que por meio do uso de dispositivos de sombreamento bem dimensionados, é possível aumentar o PAF da edificação sem maiores prejuízos ao seu consumo energético. Ressalta-se que a área de sombreamento do elemento de controle solar é fundamental para equacionar os ganhos térmicos e lumínicos. Neste estudo, o caso que possuía tela com 25% de perfuração apresentou o melhor desempenho termoenergético do edifício, no entanto, não garantiu desempenho adequado de iluminação natural na ZB2.

Entre os parâmetros construtivos analisados, a escolha do tipo de envidraçamento externo da edificação foi determinante para o alcance de níveis elevados de eficiência energética. Um vidro adequado pode favorecer o desempenho da edificação, apresentando maior impacto do que a alteração do PAF, em fachadas altamente envidraçadas. Além disso, foi observado que quanto maior a transmitância visível (tvis) de um vidro, maior a probabilidade de ocorrência de ofuscamento, o que corrobora a importância de criar-se condições para atendimento a critérios térmicos e lumínicos de maneira combinada.

Quando comparado a um vidro absorvente cinza, o uso de um vidro do tipo *low-e* em uma fachada semi-cortina promoveu maior acesso à iluminação natural sem comprometer o desempenho energético do edifício por limitar as transferências térmicas para o ambiente interno. Por outro lado, o vidro *low-e* aumentou a probabilidade de ofuscamento pelo acréscimo de área com possibilidade de visuais com brilho perturbador ou intolerável, tornando imprescindível o sombreamento parcial das aberturas para melhores resultados quanto à qualidade da iluminação.

A adição de uma persiana às janelas da edificação melhorou o desempenho do edifício em 5,23% e manteve níveis aceitáveis de iluminação natural, considerando o controle de acionamento automatizado. No entanto, dispositivos de sombreamento fixos foram considerados mais promissores, ao equilibrar baixo consumo de energia para climatização artificial, combinado ao maior conforto visual dos usuários.

A ampliação do PAF do edifício sempre propiciou o aumento do consumo de energia para condicionamento de ar, ao mesmo tempo em que proporcionou maior desconforto visual em função da maior área de vidro exposta à radiação solar direta. Assim, os casos com fachada dupla e maior PAF da camada interna, bem como com fachada cortina, apresentaram os piores resultados de desempenho do edifício.

A alteração de uma fachada semi-cortina (PAF 50%) para uma cortina (PAF 75%) representou um aumento de 28,61% na demanda de energia, sendo que o

consumo para resfriar a edificação foi superior a 30%, em função da elevada transparência à radiação solar. Já nos casos com fachada dupla, o maior PAF combinado ao maior isolamento desta tipologia comprometeu o seu desempenho ao dificultar a dissipação dos ganhos de calor, aumentando, dessa forma, a carga térmica interna.

Em termos de desempenho lumínico, ambos os casos proporcionaram amplo acesso à iluminação natural, todavia, altas porcentagens de brilho foram identificadas, sendo maiores nos casos com fachada cortina, uma vez que a camada dupla de vidro conseguiu barrar parcialmente a radiação solar direta.

Os resultados desta pesquisa tornaram evidente o quão complexo pode ser atender a critérios de desempenho lumínico e termoenergético simultaneamente, uma vez que, ao se aumentar o acesso à luz natural, pode-se promover o aumento do consumo energético da edificação. Por outro lado, quando há excesso de ofuscamento, a combinação de maior acesso à luz natural com baixo consumo energético pode não garantir iluminação de qualidade, o que demonstra a importância de se encontrar o ponto de equilíbrio entre estas demandas.

Diante do exposto, por meio desta pesquisa espera-se contribuir com maiores informações sobre o desempenho lumínico e termoenergético de diferentes tipologias de fachadas envidraçadas, no contexto climático do sul do Brasil, especificamente na ZB2. Atender a ambos os critérios é indispensável na busca por edificações mais sustentáveis e eficientes energeticamente, que propiciem melhores condições de conforto aos usuários, o objetivo primeiro das intervenções de arquitetos e urbanistas.

5.1 Limitações da pesquisa

Este trabalho apresentou algumas limitações que aparecem abaixo descritas:

- a) as obstruções do entorno foram desconsideradas durante as avaliações de iluminação natural;
- b) as simulações computacionais foram realizadas com o edifício orientado no sentido norte-sul, conforme o estudo de caso, com maior área de vidro voltada para a orientação solar sul. Esta orientação é benéfica em edificações com fachadas altamente envidraçadas, ao sofrer menor influência da incidência de radiação solar direta. Neste sentido, os resultados poderiam sofrer variações se consideradas orientações solares distintas;

c) as análises de desempenho termoenergético consideraram apenas a demanda para climatização artificial do edifício, não considerando o seu consumo global, devido às limitações do *software EnergyPlus* para integrar luz natural e artificial;

d) de acordo com a INI-C (INMETRO, 2021), que adota como critério de análise as regulamentações da IES LM 83-12 (IESNA, 2012), as avaliações de sDA devem considerar sempre a adição de dispositivos de controle solar em janelas externas voltadas para orientações expostas à radiação solar direta. Esses elementos não foram considerados nesta pesquisa, salvo no CR-1, uma vez que o objetivo foi determinar a melhor tipologia de fachada para a ZB2. Além disso, a presença de dispositivos de sombreamento internos poderia influenciar nos resultados;

e) as avaliações dos casos com dispositivo de sombreamento fixo consideraram a tela perfurada de forma simplificada, baseada apenas nos diferentes percentuais de perfuração. Trabalhos que se concentram especificamente na sua análise costumam avaliar forma, geometria, dimensões e distribuição das aberturas;

f) embora o objeto do estudo de caso esteja localizado na cidade de Pelotas-RS, foi necessário o uso do arquivo climático de Santa Maria-RS, também ZB2, para as simulações computacionais, uma vez que foram identificadas inconsistências nos arquivos climáticos disponíveis para a cidade de Pelotas-RS.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

a) estender esta pesquisa as demais zonas bioclimáticas brasileiras;

b) avaliar a influência de diferentes orientações solares nos desempenhos lumínico e termoenergético considerando diferentes tipologias de fachadas envidraçadas;

c) ampliar a análise dos diferentes tipos de vidro nas diversas tipologias de fachadas analisadas;

d) avaliar o impacto de diferentes tipos de vidro, tanto na configuração da camada interna quanto externa dos casos com fachada dupla;

e) avaliar o desempenho lumínico e termoenergético considerando diferentes tipos de geometria da cavidade ventilada nos casos com fachada dupla;

f) analisar a influência do acréscimo de dispositivos de sombreamento nos casos com fachada dupla (fachada dupla híbrida).

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações - Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR 15215-1**: Iluminação natural – Parte 1: Conceitos básicos e definições. Rio de Janeiro, 2005

_____. **NBR ISO/CIE 8995-1**: Iluminação de ambientes de trabalho – Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 7199**: Vidros na construção civil: Projeto, execução e aplicações. Rio de Janeiro, 2016.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook**: Fundamentals. Atlanta, USA: ANSI/ASHRAE, 2009.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, USA: ANSI/ASHRAE, 2013.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERANT AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 140-2014**: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs. Atlanta, USA: ANSI/ASHRAE, 2014.

ABASCAL, E. H. S. Fontes e diretrizes da arquitetura contemporânea: uma reflexão crítica a respeito desta genealogia. **Cadernos de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 5, n. 1, 3 fev. p. 1-14, 2008. Disponível em: <http://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/cpgau/article/view/5962>. Acesso em: 21 fev. 2020.

ALBERTO, A.; RAMOS, N. M. M.; ALMEIDA, R. M. S. F. Parametric study of double-skin facades performance in mild climate countries. **Journal of Building Engineering**, v. 12, p. 87-98, 2017.

ALIBABA, H. Z.; OZDENIZ, M. B. Energy Performance and Thermal Comfort of Double-Skin and Single-Skin Facades in Warm-Climate Offices. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 15, n. 3, p. 635-642, sep. 2016.

ANDELKOVIC, A. S. .; MUJAN, I.; DAKIĆ, S. Experimental validation of a EnergyPlus model: Application of a multi-storey naturally ventilated double skin façade. **Energy and Buildings**, v. 118, p. 27–36, 2016.

ANDREIS, C. **Influência de fachadas envidraçadas no consumo de energia de**

um edifício de escritórios em diferentes cidades brasileiras. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/129677/330266.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 06 de ago. 2019

ANDREIS, C.; BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho energético de fachadas envidraçadas em climas brasileiros. *In: XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído*, 2014, Maceió. **Anais [...]**. Maceió: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ANTAC), 2014.

ATZERI, A.; CAPPELLETTI, F.; GASPARELLA, A. Internal versus external shading devices performance in office buildings. **Energy Procedia**, v. 45, p. 463-472, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214000514>. Acesso em: 19 de jun. 19

BARBOSA, C. V. T. **Percepção da Iluminação no Espaço da Arquitetura: Preferências Humanas em Ambientes de Trabalho.** 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-02022012-094105/publico/Claudia_Veronica_Tese.pdf. Acesso em: 15 de mar. 20

BARBOSA, S.; IP, K. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 1019-1029, 2014.

BOYCE, Peter R. **Human Factors in Lighting.** 2. ed. London: Taylor & Francis, 2003. 525 p.

BOYCE, P.; HUNTER, C.; HOWLETT, O. The Benefits of Daylight through Windows. U.S. Department of Energy, Lighting Research Center, New York, 2003.

BRUGNERA, R. R. **Análise Integrada de Desempenho Energético, Impacto Ambiental e Custo:** Estudo de Soluções de Fachada para Edifícios de escritório no Brasil. 2018. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/102/102131/tde-31082018-154505/publico/TeseCorrigidaRosileneRegolao.pdf>. Acesso em: 15 de nov. 2019

BRUGNERA, R. R. *et al.* Escritórios de planta livre: o impacto de diferentes soluções de fachada na eficiência energética. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 3, p. 295-315, jun. 2019.

BUSTAMANTE, W.; URIBE, D.; VERA, S.; MOLINA, G. An integrated thermal and lighting simulation tool to support the design process of complex fenestration systems for office buildings. **Applied Energy**, v. 198, p. 36–48, jul. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261917304397>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CAMMARANO, S. *et al.* Daylighting design for energy saving in a building global energy simulation context. **Energy Procedia**, v. 78, p. 364-369, 2015.

CAVALERI, M. P. M.; CUNHA, G. R. M.; GONÇALVES, J. C. S. Iluminação natural em edifícios de escritórios: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 1, p. 19-34, mar. 2018.

CARAM, R. M. *et al.*; Estudo do ganho de calor em vidros planos e refletivos através de células-teste. *In*: IX Encontro Nacional E V Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. **Anais [...]** Ouro Preto, 2007, p. 1-10.

CARVALHO, M. M. Q.; ROVERE, E. L.; GONÇALVES, A. C. M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, n. 9, p. 3199-3205, dez. 2010. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110001899>. Acesso em: 10 nov. 2021.

CENTER FOR THE BUILT ENVIRONMENT. About mixed-mode. **mixed mode- case studies and project database**. Disponível em:

<https://cbe.berkeley.edu/mixedmode/index.html>. Acesso em: 13 mar. 2020.

CHAN, A. L. S. *et al.* Investigation on energy performance of double skin façade in Hong Kong. **Energy and Buildings**, v. 41, p. 1135-1142, 2009.

CHI, D. A.; MORENO, D.; NAVARRO, J. Design optimisation of perforated solar façades in order to balance daylighting with thermal performance. **Building and Environment**, v. 125, p. 383-400, nov. 2017.

DAVID, M. *et al.* Assessment of the thermal and visual efficiency of solar shades. **Building and Environment**, v. 46, n. 7, p. 1489-1496, jul. 2011.

DE MACÊDO, C. C. **Análise do desempenho térmico e luminoso de sistemas de iluminação natural que utilizam a luz direta do sol**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

DE MOURA, R. M. G. R. **Ari Marangon - 25 anos de arquitetura**. Santa Maria, Pallotti, 2004.

DE OLIVEIRA, L. A. **Metodologia para desenvolvimento de projeto de fachadas leves**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. Disponível em:

<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-08092010-125813/pt-br.php>. Acesso em: 23 de fev. 20

DE OLIVEIRA, L.; MARQUES, T. H. T. Building Envelope Energy Performance of High-Rise Office buildings in Sao Paulo city, Brazil. **Procedia Environmental Sciences**, v. 38, p. 821-829, 2017.

DE SOUZA, L. C. O. **Estudo da eficiência de fachadas duplas no desempenho térmico de edificações**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro

Preto, Ouro Preto, 2017. Disponível em:
<https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/7874>. Acesso em: 01 de abril 2020

DÍAZ, L. A. **Ensaio do método para análise integrada da iluminação natural e da conveniência solar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

DIDONÉ, E. L.; PEREIRA, F. O. R. Simulação computacional integrada para a consideração da luz natural na avaliação do desempenho energético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, p. 139-154, out./dez. 2010. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/ac/a/XDRjwfZQ35YRLPfbXGQmDSC/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 27 de fev. 20

DIDONÉ, E. L. A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC. 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

DING, W., HASEMI, Y; YAMADA ,T. Natural ventilation performance of a double-skin façade with a solar chimney. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p.411-418, 2005.

ENERGYPLUS. Version 8.7 Documentation: Input Output Reference - The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output. **EnergyPlus**. San Francisco, CA: NREL, 2019. Disponível em:
https://energyplus.net/sites/all/modules/custom/nrel_custom/pdfs/pdfs_v8.7.0/InputOutputReference.pdf. Acesso em: 20 abr. 2020.

ETMAN, O; TOLBA, O; EZZELDIN, S. Double-Skin façades in Egypt between parametric and climatic approaches. In: Computation and Performance Proceedings of the 31st International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2013, Delft, The Netherlands. **Anais [...]** Delft, The Netherlands, 2013,p. 459-465.

FASI, M. A.; BUDAIWI, I. M. Energy performance of windows in office buildings considering daylight integration and visual comfort in hot climates. **Energy and Buildings**, v. 108, p. 307-316, dec. 2015.

FELIPPE, A. R. **Desempenho luminoso e energético de vidros de controle solar e dispositivos de sombreamento**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. Disponível em:
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/171443>. Acesso em: 18 de ago. 19

FERNANDES, J. T. **Qualidade da iluminação natural e o projeto arquitetônico: a relação da satisfação do usuário quanto à vista exterior da janela e a percepção de ofuscamento**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e

Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/23960>. Acesso em: 14 de mar. 20

FONSECA, I.; BARBOSA, E.; ALVAREZ, A.; PORTO, M. Arquitetura moderna e conforto ambiental nos trópicos – diretrizes aplicáveis as casas de Lucio Costa na Gávea, Rio de Janeiro. *In*: 8º Seminário DOCOMOMO Brasil, 2009, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <https://docomomo.org.br/wp-content/uploads/2016/01/043-1.pdf>. Acesso em: 13 abril 2016.

FREEWAN, A. A. Y. Impact of external shading devices on thermal and daylighting performance of offices in hot climate regions. **Solar Energy**, v. 102, p. 14-30, apr. 2014.

GÓES, T. M.; AMORIM, C. D. N.; SILVA, C.F. Fachadas duplas: desempenho termoenergético de alternativas de projeto em edifícios comerciais no contexto climático de Brasília - DF. **Gestão do Ambiente Construído**: Atena, 2020.

GONÇALVES, J. C. S.; VIANNA, N. S.; MOURA, N. C. da S. **Iluminação natural e artificial**. Rio de Janeiro: PROCEL, 2011.

HEE, W. J. *et al.* The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 42, p. 323-343, feb. 2015.

HONG, T.; CHOU, S. K.; BONG, T. Y. Building simulation: An overview of developments and information sources. **Building and Environment**, v. 35, n. 4, p. 347-361, 2000.

HUANG, Y.; NIU, J. LEI; CHUNG, T. MING. Comprehensive analysis on thermal and daylighting performance of glazing and shading designs on office building envelope in cooling-dominant climates. **Applied Energy**, v. 134, p. 215-228, dec. 2014.

HUNTER, D.. Screenpanel. Disponível em: <https://architectural.hunterdouglas.com.br/linha/controle-solar/screenpanel> Acesso: 05 de fev. de 2022

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **Lighting Handbook**. 10 ed. New York: IESNA, 2011.

ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA. **IES LM 83-12**: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE). New York: IESNA, 2012.

INMET - LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. Arquivos climáticos INMET 2018. **LabEEE**. Disponível em: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2018>. Acesso em: jul. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Instrução Normativa INMETRO para a classificação de eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas. Anexo da Portaria INMETRO N° 42/2021**. Brasília: Ministério da Economia; INMETRO, 2021.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global Energy & CO₂ Status Report 2019. **iea.org**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>. Acesso em: 20 mar. 2021.

JAKUBIEC, J. A.; REINHART, C. F. DIVA 2.0: Integrating daylight and thermal simulations using rhinoceros 3D, DAYSIM and EnergyPlus. *In: Proceedings of Building Simulation 2011 - 12th Conference of International Building Performance Simulation Association*, 2011, Sidney, Austrália. **Anais [...]** Sidney, Austrália, 2011, p. 2202-2209.

KHALIFA, I. *et al.* Assessment of the Inner Skin Composition Impact on the Double-skin Façade Energy Performance in the Mediterranean Climate. **Energy Procedia**, v. 111, p. 195–204, sep. 2017.

KLEINDIENST, S.; ANDERSEN, M. Comprehensive annual daylight design through a goal-based approach. **Building Research and Information**, v. 40, n. 2, p. 154-173, fev. 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/239789800_Comprehensive_Annual_Daylight_Design_through_a_Goal-Based_Approach. Acesso em: 10 de nov. 2021.

KÖPPEN, W. O sistema geográfico de climas. *In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Eds.). Manual de climatologia*. Berlim, Alemanha: Gebruder Borntrager, 1936. p. 1-44.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259-263, 2006. Disponível em: http://koeppen-geiger.vuwien.ac.at/pdf/Paper_2006.pdf. Acesso em: 15 fev. de 2020.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: Eletrobras; PROCEL, 2014. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/apostilas/eficiencia_energetica_na_arquitetura.pdf. Acesso em: 16 de out. 2019

LAMBERTS, R.; FOSSATI, M. Eficiência energética da envoltória de edifícios de escritórios de Florianópolis: discussões sobre a aplicação do método prescritivo do RTQ-C. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 59-69, abr./jun. 2010.

LARSEN, S. F.; RENGIFO, L.; FILIPPÍN, C. Double skin glazed façades in sunny Mediterranean climates. **Energy and Buildings**, v. 102, p. 18-31, sep. 2015.

LAVIN, C.; FIORITO, F. Optimization of an external perforated screen for improved daylighting and thermal performance of an office space. **Procedia Engineering**, v. 180, p. 571-581, 2017.

LBNL - Lawrence Berkeley National Laboratory. **Windows & Daylighting Software**: Building Technology & Urban Systems. Disponível em: <https://windows.lbl.gov/software-release-window-7707>. Acesso em: 03 mar. 2021.

LEAL, L. DE Q.; LEDER, S. M. Iluminação natural e ofuscamento: estudo de caso em edifícios residenciais multipavimentos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 97-117, out./dez. 2018. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ac/a/szzFbbD4J7tcRLswrTQtL8m/?lang=pt>. Acesso em: 23 de fev. 20

LECHNER, N. H. C. L. *Sustainable Design Methods for Architects*. 4. ed. New Jersey: Wiley, 2015.

LIU, A. W. **Diretrizes para projetos de edifícios de escritórios**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19102010-163058/publico/Dissertacao_Ana_Wansul_Liu.pdf. Acesso em: 14 de fev. 20

LIU, X. *et al.* Illumination distribution and daylight glare evaluation within different windows for comfortable lighting. **Results in Optics**, v. 3, p. 1-9, may. 2021.

LUCCAS, L. H. H. *Arquitetura Moderna em Porto Alegre: uma história recente*. p. 22-30, 2000. **Arqtexto**. Disponível em: https://www.ufrgs.br/propar/publicacoes/ARQtextos/PDFs_revista_0/0_Luccas.pdf. Acesso em: 2 nov. 2021

MARCONDES, P. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**. 2010. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-10112010-102255/pt-br.php>. Acesso em: 19 de mar. 20

MARDALJEVIC, J. *et al.* Daylighting metrics: is there a relation between useful daylight illuminance and daylight glare probability? *In: First Building Simulation and Optimization Conference, 2012, IBPSA England*. **Anais [...]** IBPSA England, 2012.

MARDALJEVIC, J. Climate-Based Daylight Modelling and Its Discontents. *In: CIBSE Technical Symposium*, 2015, London. **Anais [...]**. London, 2015, p 1-12.

MAZZAROTTO, A. C. E. K. **Uso do sistema de fachadas duplas ventiladas em edifícios em Curitiba**: verificação computacional de desempenho comparativo com soluções convencionais. 2011. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Programa de PósGraduação em Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/27053>. Acesso em: jul. 2021

MELA, D. **Caracterização de fachadas duplas no Brasil**. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/handle/123456789/19393>. Acesso em: 20 de abr. 20

METTANANT, V.; CHAIWIWATWORAKUL, P. Automated vertical blinds for daylighting in tropical region. **Energy Procedia**, v. 52, p. 278-286, 2014.

MONTAGNER, B. C. *Arquitetura Moderna em Pelotas, 1950-1980*. 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em:

bdt.d.ibict.br/vufind/Record/UFPL_5048145a30acd03bd19b0cb91b2e58cc. Acesso em: ago. 2019

MORAES, L. N.; PEREIRA, F. O. R. Desenvolvimento de um método simplificado para avaliação do desempenho dinâmico da luz natural e sua influência sobre a eficiência energética. *In: III Encontro da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo*, 2014, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo, 2014.

MOURA, P. W. **Avaliação do desempenho lumínico e termoenergético em modelo de prédio administrativo**: estudo de caso na Universidade Federal do Rio Grande - FURG. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas 2017. Disponível em: guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/5255. Acesso em: 25 de mai. 2019

MOURA, P. W. C.; CELINA MARIA BRITTO; CUNHA, E. G. DA. Evaluation of Daylighting and Thermo-Energetic Performance in Administrative Building in the South of Brazil. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 14, n. 1, p. 20-36, jan. 2020.

PAPPAS, A.; ZHAI, Z. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 4, p. 466-475, 2008.

PELLEGRINO, A. *et al.* Impact of daylighting on total energy use in offices of varying architectural features in Italy: results from a parametric study. **Building and Environment**, v. 113, p. 151-162, feb. 2017.

PEREIRA, D. C. L. **Iluminação natural em edifícios de escritório**: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso. 2017. Tese (Doutorado em Ciências) - Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-22062017-155747/publico/DanielaCardosoLaudaresPereira_corrigida.pdf. Acesso em: 14 de fev. 20

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Estado da arte em eficiência energética**: iluminação e envoltória. Florianópolis: LabEEE; PROCEL; Eletrobras; FEESC, 2013. Disponível em: https://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/EstadoArtelluminacaoEnvoltoria_31072013%282%29.pdf. Acesso em: 13 de mar. 20

PINTO, M. M. Desempenho energético de edifícios com vidros insulados em climas brasileiros. 2017. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/185508>. Acesso em: 18 de ago. 19

PISANI, M. A. J.; FIGUEIREDO, E. C. Edifícios de escritórios em São Paulo: tipologias de 1979 a 2010. *In: 11ª Conferência Internacional da LARES Centro*

Brasileiro Britânico, 2011, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo, 2011.

PLANAS, C.; CUERVA, E.; ALAVEDRA, P. Effects of the type of facade on the energy performance of office buildings representative of the city of Barcelona. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 9, n. 4, p. 3325-3334, dec. 2018.

POMPONI, F.; BARBOSA, S.; PIROOZFAR, P. A. E. On the Intrinsic Flexibility of the Double Skin Façade: A Comparative Thermal Comfort Investigation in Tropical and Temperate Climates. **Energy Procedia**, v. 111, p. 530-539, 2017.

RADHI, H.; SHARPLES, S.; FIKIRY, F. Will multi-facade systems reduce cooling energy in fully glazed buildings? A scoping study of UAE buildings. **Energy and Buildings**, v. 56, p. 179-188, 2013.

RAMOS, G.; GHISI, E. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 2, p. 157–169, 2010a. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ac/a/F3q6vZprD3jmZdwVqbryhxz/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 18 de ago. 19

RAMOS, G.; GHISI, E. Analysis of daylight calculated using the EnergyPlus programme. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1948-1958, 2010.

REINHART, C. F. **Tutorial on the Use of Daysim Simulations for Sustainable Design**. Institute for research in Construction National Research Council Canada, Canada. 2006

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. **LEUKOS - Journal of Illuminating Engineering Society of North America**, v. 3, n. 1, p. 7-31, 2006.

ROCHA, A. P. de A.; PEREIRA, F. O. R. Avaliação do consumo de energia de edificações considerando a luz natural e sistemas de controle através de simulação computacional integrada. *In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído*, 2011, Búzios, RJ. **Anais [...]**. Búzios, RJ. Disponível em: <https://ctec.ufal.br/grupopesquisa/grilu/Artigos/Avaliação%20do%20Consumo%20de%20Energia%20de%20Edificações%20Considerando%20a%20Luz%20Natural%20e%20Sistemas%20de%20Controle%20através%20de%20Simulação%20Computacional%20Integrada.pdf>. Acesso em:

RORIZ, M. **Arquivos Climáticos de Municípios Brasileiros**. São Carlos, SP: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Grupo de Trabalho sobre Conforto e Eficiência Energética de Edificações, 2012. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/sobre_epw.pdf. Acesso em: 2 de nov. 21

RUNDLE, C. A. *et al.* Validation of computational fluid dynamics simulations for atria geometries. **Building and Environment**, v. 46, n. 7, p. 1343-1353, 2011.

SACHT, H. M. *et al.* Sistemas de Fachadas Inovadoras e Conforto térmico: Estudo

em Portugal. **Revista Tecnológica Maringá**, v. 21, p. 14, 2012. Disponível em: <http://ojs.uem.br/ojs/index.php/RevTecnol/article/viewFile/14778/10276> . Acesso: 21 out. 2018

SHAMERI, M. A. *et al.* Daylighting characteristics of existing double-skin façade office buildings. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 279-286, 2013.

SIGNORINI, V. B. **O aproveitamento da luz natural em prédios públicos administrativos**: estudo de caso em prédio da UFPel. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em: guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/5213. Acesso em: 24 de mai. 19

SOLEMMA LLC. **ClimateStudio User Guide** - 2021. Disponível em: <https://climatestudiodocs.com/> Acesso: 8 ago. 2021.

SU, Z.; LI, X.; XUE, F. Double-skin façade optimization design for different climate zones in China. **Solar Energy**, v. 155, p. 281-290, 2017.

TABADKANI, A. *et al.* Analysis of the impact of automatic shading control scenarios on occupant's comfort and energy load. **Applied Energy**, v. 294, jul. 2021.

TAGLIABUE, L. C.; BUZZETTI, M.; AROSIO, B. Energy saving through the sun: Analysis of visual comfort and energy consumption in office space. **Energy Procedia**, v. 30, p. 693-703, feb. 2012.

TORRES, M. *et al.* Double skin façades - cavity and exterior openings dimensions for saving energy on mediterranean climate. *In*: IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association, 2007, Beijing, China. **Anais [...]**. Beijing, China, 2007, p. 198-205.

TREGUENZA, P; LOE, D. **Projeto de Iluminação**. Porto Alegre: Bookman, 2015.

VEDOVELLO, C. A. da S. **Gestão de projetos de fachadas**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-06062013-163302/pt-br.php>. Acesso em: 20 de fev. 20

VEITCH, J. A.; CHRISTOFFERSEN, J.; GALASIU, A. D. Daylight and View through Residential Windows: effects on Well-being. **Residential daylighting and well-being**, p. 1-6, 2013a.

VEITCH, J. A.; CHRISTOFFERSEN, J.; GALASIU, A. D. What we know about windows and well-being, and what we need to know. *In*: Proceedings of CIE Centenary Conference "Towards a new century of light", 2013, Paris. **Anais [...]**. Paris, apr. 2013b, p. 169-177.

VETTORAZZI, E. **Contribuições das estratégias do conceito Passive House para edificações energeticamente mais eficientes na Região Sul-Brasileira**. 2019. Tese (Doutorado em Arquitetura) - Programa de Pesquisa e Pós-graduação em Arquitetura. Contribuições, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

VIEIRA, E. G. T. Y. **Impacto da orientação solar e do tipo de vidro no desempenho térmico da envoltória de uma edificação residencial envidraçada: análise segundo a etiqueta PBE Edifica**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127687>. Acesso em: 10 de nov. 2021

WEN, Y. *et al.* The impact of opening sizing on the airflow distribution of double-skin facade. **Procedia Engineering**, v. 205, p. 4111-4116, 2017.

WIENOLD, J.; CHRISTOFFERSEN, J. Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 7, p. 743-757, jul. 2006.

XU, L. *et al.* Lighting energy efficiency in offices under different control strategies. **Energy & Buildings**, v. 138, p. 127-139, dec. 2016.

Apêndices

Apêndice A – Cálculo da cerâmica equivalente

Resistência térmica da parede

Tijolo 9x14x19

Espessura da argamassa de assentamento 1cm

Espessura do reboco 2,5cm

Espessura total da parede 14m

Seção A (reboco + argamassa + reboco)

$$A1 = 0,01 \times 0,19 + 0,01 + \times 0,15$$

$$A1 = 0,0034\text{m}^2$$

$$R1 = \frac{e \text{ reboco}}{\lambda \text{ reboco}} + \frac{e \text{ argamassa}}{\lambda \text{ argamassa}} + \frac{e \text{ reboco}}{\lambda \text{ reboco}}$$

$$R1 = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,025}{1,15}$$

$$R1 = 0,12173 \text{ m}^2.\text{k/W}$$

Seção B (reboco + tijolo + reboco)

$$A2 = 2 \times (0,015 \times 0,19) + 2 \times (0,01 \times 0,19)$$

$$A2 = 0,0095 \text{ m}^2$$

$$R2 = \frac{e \text{ reboco}}{\lambda \text{ reboco}} + \frac{e \text{ argamassa}}{\lambda \text{ argamassa}} + \frac{e \text{ reboco}}{\lambda \text{ reboco}}$$

$$R2 = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,025}{1,15}$$

$$R2 = 0,1434 \text{ m}^2.\text{k/W}$$

Seção C (reboco + tijolo + ar + tijolo + ar + tijolo + reboco)

$$A3 = 3 (0,03 \times 0,19)$$

$$A3 = 0,0171\text{m}^2$$

$$R3 = 2 \cdot \frac{e \text{ reboco}}{\lambda \text{ reboco}} + 3 \cdot \frac{e \text{ cerâmica}}{\lambda \text{ cerâmica}} + 2 \cdot AR$$

$$R3 = 2 \cdot \frac{0,025}{1,15} + 3 \cdot \frac{0,01}{0,90} + 2 \cdot 0,16$$

$$R3 = 0,3968 \text{ m}^2.\text{k/W}$$

Resistência térmica da parede

$$R_{\text{térmica}} = \frac{A1+A2+A3}{\frac{A1}{R1} + \frac{A2}{R2} + \frac{A3}{R3}}$$

$$R_{\text{térmica total}} = 0,2187 \text{ m}^2.\text{k/W}$$

Resistência térmica total

$$Rt = Rse + Rt + Rsi = 0,13 + 0,2187 + 0,04 = 0,3887 \text{ m}^2.\text{k/W}$$

Cálculo da capacidade térmica

$$CT = e \text{ (espessura)} \times \rho \text{ (densidade de massa aparente)} \times c \text{ (calor específico)}$$

$$CT1 = CT \text{ reboco} + CT \text{ argamassa} + CT \text{ reboco}$$

$$CT1 = (e \times p \times c) \text{ reboco} + (e \times p \times c) \text{ argamassa} + (e \times p \times c) \text{ reboco}$$

$$CT1 = (0,04 \times 2200 \times 1) + (0,14 \times 2000 \times 1) + (0,025 \times 2000 \times 1)$$

$$CT1 = 0,14 \times 2000 \times 1$$

$$CT1 = 280 \text{ KJ/m}^2.\text{k}$$

$$CT2 = CT \text{ reboco} + CT \text{ cerâmica} + CT \text{ reboco}$$

$$CT2 = (0,025 \times 2000 \times 1) \times 2 + (0,09 \times 1600 \times 0,92)$$

$$CT2 = 232,48 \text{ kJ/m}^2.\text{k}$$

$$CT3 = CT \text{ reboco} + CT \text{ cerâmica} \times 3 + CT \text{ reboco} + ar$$

$$C3 = (e \times p \times c) \times 2 + (e \times p \times c) \times 3$$

$$C3 = (0,025 \times 2000 \times 1) \times 2 + (0,01 \times 1600 \times 0,92) \times 3$$

$$CT3 = 144,16 \text{ kJ/m}^2.\text{k}$$

$$CT \text{ total} = \frac{A1+A2+A3}{\frac{A1}{CT1} + \frac{A2}{CT2} + \frac{A3}{CT3}}$$

$$CT \text{ total} = 215,50 \text{ KJ/m}^2.\text{k}$$

Cálculo da parede equivalente

$$0,2187 = R \text{ reboco} + R \text{ cerâmica equivalente} (x2) + R \text{ ar} + R \text{ reboco}$$

$$0,2187 = \frac{0,025}{1,15} \cdot 2 + 2 \cdot \frac{e \text{ cerâmica equivalente}}{0,90} + 0,14$$

$$e \text{ cerâmica equivalente} = 0,0158 - \text{retirar camada de ar}$$

$$R_{\text{real}} = R \text{ reboco} + R \text{ cerâmica equivalente} + R \text{ reboco}$$

$$0,2187 = 2 \cdot \frac{0,025}{1,15} + 2 \cdot \frac{e \text{ cerâmica}}{0,90}$$

Espessura da cerâmica equivalente $\cong 0,16 \text{ cm}$

$$CT \text{ real} = CT \text{ equivalente}$$

$$215,50 = CT \text{ reboco} + CT \text{ cerâmica equivalente} + CT \text{ reboco}$$

$$258,46 = (e \times p \times c) \text{ reboco} + (e \times p \times c) \text{ cerâmica} + (e \times p \times c) \text{ reboco}$$

$$258,46 = (0,025 \times 2000 \times 1) \cdot 2 + (0,16 \times p \times 0,92)$$

$$p = 784,65 \text{ kg/m}^2 \text{ (densidade da cerâmica equivalente)}$$

Apêndice B – Cálculos para modificar a condutividade térmica da fachada cortina

Com o intuito de considerar o efeito estufa ocasionado pela fachada cortina, foram realizados cálculos para modificar a condutividade térmica dessa fachada, através da alteração da condutividade do material chamado de “revestimento de vidro” visando com isso, considerar a resistência térmica da câmara de ar.

O “revestimento de vidro” corresponde a um vidro laminado absorvente cinza no Caso Base e a um vidro low-e no caso de referência CR-2, com suas devidas condutividades térmicas alteradas.

Dessa forma, de acordo com Brugnera (2018), para considerar a resistência da camada de ar, a condutividade térmica do ar, somada à do vidro, deveria ser próximo à da camada de ar. Assim de acordo com a Equação 1, a resistência térmica é inversamente proporcional a condutividade, sendo necessário adicionar as resistências da câmara de ar e do vidro

$$Resistência = \frac{e}{\lambda}$$

Onde:

R= resistência térmica da camada m².k/W;

e = espessura do material (m)

λ = condutividade térmica do material em W/m².k

Assim, considerando um modelo de fachada correspondente ao Caso Base:

R_{ar} = 0,17 m².k/W (ABNT, 2005b)

R vidro = $\frac{0,006}{0,68}$ (espessura/condutividade)

R vidro = 0,0088

R_{total}=0,1788m².K/W.

Dessa forma, a condutividade total, somando a camada de ar e do vidro, será:

$$\lambda_{total} = \frac{0,09}{0,1788}$$

λ_{total} = 0,503 W/m².k

A condutividade de 0,503 W/m².k foi utilizada nas configurações do chamado “revestimento de vidro” do Caso Base, correspondente ao mesmo vidro utilizado na

esquadria, porém com a condutividade alterada para representar o efeito estufa na fachada cortina. Os cálculos foram adaptados de acordo com Brugnera (2018).

O mesmo dimensionamento foi realizado para configuração do caso de referência CR-2:

$$R_{ar} = 0,17 \text{ m}^2.k/W \text{ (ABNT, 2005b)}$$

$$R_{vidro} = \frac{0,006}{1} \text{ (espessura/condutividade)}$$

$$R_{vidro} = 0,006$$

$$R_{total} = 0,176 \text{ m}^2.k/W.$$

Dessa forma, a condutividade total, somando a camada de ar e do vidro, será:

$$\lambda_{total} = \frac{0,09}{0,176}$$

$$\lambda_{total} = 0,511 \text{ W/m}^2.k$$

Apêndice C

Os resultados de consumo energético global do edifício Caso Base (CB), obtidos por meio de simulação computacional no *software EnergyPlus* são apresentados na Tabela 46. Destaca-se que o sistema de iluminação foi considerado dimerizável e o modo de ventilação híbrido. A área total do edifício é de 3128,35m², enquanto a área condicionada corresponde a 2639,34m². O consumo é apresentado em kWh/m².ano. de área condicionada.

Tabela 46 - Consumo energético total do Caso Base em kWh/m².ano

Tipo de uso	Consumo em (kWh/m ² .ano)
Aquecimento	0,24
Resfriamento	4,83
Iluminação	14,10
Equipamentos	35,76
Outros	1,35
Total	55,06

Fonte: AUTORA com base nos dados de saída do *EnergyPlus*, 2021