

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



Dissertação

**Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética
da envoltória pela INI-C**

Luís Filipe Muta

Pelotas, 2022

Luís Filipe Muta

Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória pela INI-C

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.

Orientador: Antonio César Silveira Baptista da Silva

Coorientador: Luciano de Vasconcellos Corrêa

Pelotas, 2022

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

M992a Muta, Luís Filipe

Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória pela INI-C / Luís Filipe Muta ; Antonio César Silveira Baptista da Silva, orientador ; Luciano de Vasconcellos Corrêa, coorientador. — Pelotas, 2022.

118 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, 2022.

1. Modelagem da informação da construção. 2. Diretrizes de modelagem Bim. 3. Avaliação de eficiência energética. 4. Ini-c. 5. Método simplificado. I. Silva, Antonio César Silveira Baptista da, orient. II. Corrêa, Luciano de Vasconcellos, coorient. III. Título.

CDD : 720

Luís Filipe Muta

Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética da
envoltória pela INI-C

Dissertação aprovada, como requisito parcial para a 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: 18/02/2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Antonio César Silveira Baptista da Silva (Orientador)

Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Dr. Luciano de Vasconcellos Corrêa (Coorientador)

Doutor em Educação pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Eduardo Grala da Cunha

Doutor em Arquitetura pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Aldomar Pedrini

Doutor em Arquitetura pela Universidade de Queensland

Prof.^a Dr.^a Ana Paula Melo

Doutora em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À minha família, meu mais sincero agradecimento, especialmente aos meus avós, Firoshi (in memoriam) e Harume, e ao meu tio, Luis Carlos, pela educação, suporte e valores fundamentais ao longo de toda a minha trajetória.

À Adriane Denise, por todo o amor, companheirismo e paciência.

Ao Professor Antonio César, que admiro e tenho grande apreço, que me orientou com grande afinco e profissionalismo, um grande exemplo de competência.

Ao Professor Luciano de Vasconcellos, que me coorientou, ajudando imensamente e feito grandes considerações ao decorrer da pesquisa.

À Nátali Vergara, minha preciosa amiga, por todos os momentos que compartilhamos.

Aos professores Eduardo Grala e Aldomir Pedrini e à professora Ana Paula, que aceitaram o convite para participar da minha banca de defesa, como membros da banca examinadora.

Ao professor Fábio Schramm, pelas contribuições ao longo da minha permanência no PROGRAU.

Aos docentes do PROGRAU, que contribuíram com a construção do conhecimento presente na pesquisa.

Aos meus colegas do mestrado, por todo o companheirismo e troca de conhecimentos.

À toda a equipe do LINSE (especialmente a Juliana e o Rodrigo), que me receberam tão bem e compartilharam de bom grado o conhecimento técnico.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001

Resumo

MUTA, Luís Filipe. **Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória pela INI-C.** 2022. 118 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2022.

A etiquetagem de eficiência energética em edificações é uma tendência global e o Brasil tem contribuído com o tema a partir de iniciativas como o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica). Foram apresentadas medidas relevantes, como as criações dos regulamentos técnicos do Inmetro, da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), da Instrução Normativa nº 02/2014 e a publicação da nova instrução normativa do Inmetro (INI-C). Apesar das medidas, a avaliação de eficiência energética no Brasil é pouco empregada e parte do problema reside na dificuldade para obter os dados de projeto, necessários para a avaliação das edificações. Este projeto objetivou a análise da aplicação da Modelagem da Informação da Construção (BIM) na avaliação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C. Foi realizado um estudo para analisar o potencial que a plataforma BIM apresenta para a obtenção automática dos dados de projeto. A partir do método da *Design Science Research* (DSR) foram elaboradas diretrizes para o desenvolvimento de modelos BIM focados na avaliação simplificada da envoltória. Foi observado que um modelo BIM, desenvolvido sem um foco específico na avaliação de eficiência energética, proporcionou a obtenção automática de 39% dos dados necessários para a avaliação. Notou-se que a quantidade de dados extraídos de forma automática está diretamente vinculada à forma de modelagem adotada no desenvolvimento do modelo BIM. A partir de um estudo de caso, foi realizada a aplicação das diretrizes de modelagem BIM e foi constatado que 100% dos dados necessários na avaliação de eficiência energética da envoltória foram extraídos diretamente do modelo BIM, a partir de uma tabela gerada pela plataforma. A partir desta pesquisa foi concluído que BIM apresenta potencial para dinamizar a avaliação de eficiência energética da envoltória do PBE Edifica. Entretanto, se faz necessário que o modelo BIM seja desenvolvido com foco na avaliação pelo método simplificado da INI-C.

Palavras-chave: Modelagem da Informação da Construção. Diretrizes de modelagem BIM. Avaliação de eficiência energética. INI-C. Método simplificado.

Abstract

MUTA, Luís Filipe. **Analysis of the application of BIM in the INI-C envelope energy efficiency simplified evaluation**. 2022. 118 f. Dissertation (Masters in Architecture and Urbanism) – Post Graduate Program in Architecture and Urbanism, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2022.

Energy efficiency labeling in buildings is a global trend and Brazil has contributed to the theme through initiatives such as the Brazilian Building Labeling Program (PBE Edifica). Relevant measures have been developed, such as Inmetro's technical regulations, the National Energy Conservation Label (ENCE), Normative Instruction No. 02/2014 and the publication of Inmetro's new normative instruction (INI-C). Despite the measures, the energy efficiency evaluation in Brazil is rarely performed and part of the problem lies in the difficulty in obtaining the data necessary for the evaluation. This project aimed to analyze the application of Building Information Modeling (BIM) in the envelope energy efficiency evaluation by the simplified method of INI-C. A study was carried out to analyze the potential that the BIM platform presents for the automatic extraction of project data. Based on the Design Science Research (DSR) method, modeling guidelines were created for the development of BIM models focused on the simplified evaluation of the envelope. It was observed that a BIM model, developed without a specific focus on energy efficiency evaluation, provided 39% of the necessary data for the evaluation. It was noted that the amount of data extracted automatically is directly related to the modeling guidelines adopted in the development of the BIM model. The application of the BIM modeling guidelines in a case study revealed that 100% of the data needed in the envelope energy efficiency evaluation were extracted directly from the BIM model, from a table generated by the platform. It was concluded that BIM has the potential to streamline PBE Edifica's energy efficiency evaluation. However, the BIM model needs to be developed with a focus on the energy efficiency evaluation.

Keywords: Building Information Modeling. BIM Modeling Guidelines. Energy efficiency evaluation. INI-C. Simplified Method.

Lista de Figuras

Figura 1 - Gráfico do consumo final de energia elétrica do setor de edificações no Brasil	23
Figura 2 - Exemplo de divisão de zonas térmicas pelo método simplificado da INI-C	28
Figura 3 - Modelo da ENCE de projeto para edificações comerciais, de serviços e públicas.....	32
Figura 4 - Novo modelo de ENCE de projeto para edificações comerciais, de serviços e públicas	34
Figura 5 - Gráfico do processamento da informação no processo BIM e no processo de projeto tradicional	39
Figura 6 - Output da avaliação de eficiência energética da envoltória	46
Figura 7 - Delineamento do método de pesquisa.....	50
Figura 8 - Ferramentas projetuais mais utilizadas pelos projetistas	51
Figura 9 - Protótipo representativo de grandes escritórios.....	52
Figura 10 - Sistema de alvenaria adotado para o protótipo representativo de grandes escritórios.....	53
Figura 11 - Sistema de cobertura adotado para o protótipo representativo de grandes escritórios.....	53
Figura 12 - Massa conceitual do objeto de estudo	54
Figura 13 - Modelo BIM do objeto de estudo com elementos genéricos	54
Figura 14 - Representação gráfica da parede do objeto de estudo.....	55
Figura 15 - Inserção das propriedades térmicas das janelas do objeto de estudo....	56
Figura 16 - Inserção do valor de absorvância da parede do objeto de estudo.....	56
Figura 17 - Inserção do valor de absorvância da cobertura do objeto de estudo.....	56
Figura 18 - Modelo BIM do objeto de estudo com elementos específicos	57
Figura 19 - Divisão das zonas térmicas do objeto de estudo	57
Figura 20 - Inserção das zonas térmicas do objeto de estudo	58
Figura 21 - Inserção da densidade de potência de iluminação e equipamentos do objeto de estudo.....	58
Figura 22 - Representação digital do Anexo FAUrb	60
Figura 23 - Localização do Anexo FAUrb.....	61

Figura 24 - Diretrizes de modelagem BIM com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória	63
Figura 25 - Parâmetros criados para a inserção dos valores do metamodelo	64
Figura 26 - Representação dos vínculos entre os parâmetros e as famílias de elementos.....	65
Figura 27 - Inserção das propriedades térmicas na parede externa do Anexo FAUrb	68
Figura 28 - Inserção das propriedades térmicas nas janelas do Anexo FAUrb.....	69
Figura 29 - Parâmetros associados à família de janela do Anexo FAUrb	69
Figura 30 - Inserção do endereço do projeto.....	71
Figura 31 - Rotação do norte verdadeiro.....	72
Figura 32 - Vista ortogonal do modelo BIM do Anexo FAUrb.....	72
Figura 33 - Fachadas do modelo BIM do Anexo FAUrb	73
Figura 34 - Planta baixa do térreo do modelo BIM do Anexo FAUrb.....	73
Figura 35 - Planta baixa do segundo pavimento do modelo BIM do Anexo FAUrb...	74
Figura 36 - Planta baixa do terceiro pavimento do modelo BIM do Anexo FAUrb.....	74
Figura 37 - Planta da cobertura do modelo BIM do Anexo FAUrb	75
Figura 38 - Representação dos ângulos horizontais de sombreamento do térreo	75
Figura 39 - Representação dos ângulos verticais de sombreamento do corte A-A...	76
Figura 40 - Representação dos ângulos verticais de sombreamento do corte B-B...	76
Figura 41 - Representação da montagem da cobertura oeste	77
Figura 42 - Massa conceitual do Anexo FAUrb	77
Figura 43 - Inserção das propriedades térmicas na montagem do sistema de cobertura	78
Figura 44 - Inserção dos ângulos de sombreamento na janela.....	78
Figura 45 - Passo a passo da divisão das zonas térmicas do Anexo FAUrb	79
Figura 46 - Divisão das zonas térmicas do térreo do Anexo FAUrb.....	80
Figura 47 - Divisão das zonas térmicas do segundo pavimento do Anexo FAUrb	80
Figura 48 - Divisão das zonas térmicas do terceiro pavimento do Anexo FAUrb.....	81
Figura 49 - Centralização dos dados do metamodelo na zona térmica.....	82
Figura 50 - Classificação de eficiência energética da envoltória do Anexo FAUrb....	83
Figura 51 - Dimensões da folha de vidro e da janela do objeto de estudo.....	86
Figura 52 - Valores dos parâmetros das janelas do objeto de estudo calculados pelo Revit.....	86

Figura 53 - Valores de área das fachadas do objeto de estudo calculados pelo Revit	87
Figura 54 - Aba de propriedades da parede externa do objeto de estudo	88
Figura 55 - Demonstração de um ângulo horizontal de sombreamento do objeto de estudo	89
Figura 56 - Demonstração de um ângulo vertical de sombreamento do objeto de estudo	89
Figura 57 - Análise da condição do piso e da cobertura do protótipo de grandes escritórios.....	90
Figura 58 - Análise da condição de isolamento térmico a partir do corte transversal	91
Figura 59 - Análise da condição de isolamento térmico a partir da tabela de levantamento do material	91
Figura 60 - Dados das zonas térmicas do objeto de estudo extraídos do Revit.....	92
Figura 61 - Cálculo automático da área envidraçada	95
Figura 62 - Valores extraídos das janelas do Anexo FAUrb.....	96
Figura 63 - Cálculo automático do fator de forma	97
Figura 64 - Identificação do bloco cerâmico a partir do parâmetro de nota-chave	97
Figura 65 - Valores extraídos das paredes do Anexo FAUrb	98
Figura 66 - Cobertura oeste (inclinada) do Anexo FAUrb	99
Figura 67 - Cobertura oeste do Anexo FAUrb	99
Figura 68 - Valores extraídos da cobertura do Anexo FAUrb.....	100
Figura 69 - Demonstração de ângulo horizontal de sombreamento do Anexo FAUrb	101
Figura 70 - Demonstração de ângulo vertical de sombreamento do Anexo FAUrb.	101
Figura 71 - Planilha de cálculo do PAF	102
Figura 72 - Escala para avaliar o modelo BIM resultante do artefato de pesquisa..	106

Lista de Quadros

Quadro 1 - Limites de classificação de eficiência energética da envoltória.....	31
Quadro 2 - Relação dos OIAs	32
Quadro 3 - Estágios evolutivos de BIM	40
Quadro 4 - Representação e descrição dos Níveis de Detalhamento.....	44
Quadro 5 - Características do Anexo FAUrb	62
Quadro 6 - Descrição das notas-chave do modelo BIM do Anexo Faurb.....	65
Quadro 7 - Descrição dos materiais do Anexo FAUrb.....	66
Quadro 8 - Relação dos elementos criados	67
Quadro 9 - Relação das tabelas criadas e dos parâmetros inseridos	70
Quadro 10 - Síntese dos dados obtidos do modelo BIM do objeto de estudo.....	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Limites de aplicabilidade do método simplificado para edificações condicionadas artificialmente	26
Tabela 2 - Limites de aplicabilidade do método simplificado para edificações híbridas ou totalmente ventiladas naturalmente.....	26
Tabela 3 - Características do protótipo representativo de grandes escritórios.....	52
Tabela 4 - Descrição dos materiais e das respectivas propriedades do objeto de estudo	55
Tabela 5 - Valores dos dados necessários para o cálculo do fator de forma do objeto de estudo.....	85
Tabela 6 - PAF por orientação do objeto de estudo	88

Lista de Abreviaturas e Siglas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
A_{env}	Área da envoltória
AHS	Ângulo horizontal de sombreamento
AIA	American Institute of Architects
AOV	Ângulo de obstrução vizinha
AVS	Ângulo vertical de sombreamento
BEM	Building Energy Modeling
BIM	Modelagem da Informação da Construção
CAD	Desenho Assistido por Computador
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
C_{EP}	Consumo de Energia Primária
$C_{EP,real}$	Consumo de energia primária da edificação real
$C_{EP,ref}$	Consumo de energia primária da edificação de referência
C_{gTR}	Carga térmica de refrigeração anual
C_{gTT}	Carga térmica total anual
$C_{gTT_{real}}$	Carga térmica total anual para a condição real
$C_{gTT_{ref}}$	carga térmica total anual para a condição de referência
$CRC_{gTT_{D-A}}$	Carga térmica total anual da classificação D para a A
DC_{gTR}	Densidade de carga térmica para refrigeração
DPE	Densidade de potência de equipamentos
DPI	Densidade de potência de iluminação
DSR	Design Science Research
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAUrb	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
FF	Fator de forma
FH_{desc}	Fração de horas excedentes por calor em relação às horas de ocupação
GSA	General Services Administration
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INI-R	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IPD	Integrated Project Delivery
LEED	Leadership in Energy and Environmental Design
MDIC	Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços
NBS	National Building Specification
ND	Nível de Desenvolvimento
OIA	Organismo de Inspeção Acreditado
PAF	Percentual de área de abertura na fachada da zona térmica
PBE Edifica	Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações
PHOCT	Percentual de horas ocupadas em conforto térmico
Procel Edifica	Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações

RAC	Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações
R_{se}	Resistência superficial externa
R_{si}	Resistência superficial interna
R_t	Resistência térmica calculada pela ferramenta foi a de superfície para superfície
R_T	Resistência térmica calculada pela ferramenta foi a de ambiente para ambiente
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
U	Transmitância térmica
UFPEl	Universidade Federal de Pelotas
V_{tot}	Volume total construído da edificação
ZTI	Zona térmica interna
ZTP	Zona térmica perimetral

Sumário

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Problema	17
1.2	Questões de pesquisa.....	21
1.3	Objetivos	21
1.3.1	Geral	21
1.3.2	Específicos	22
1.4	Estrutura.....	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	23
2.1	Eficiência energética em edificações	23
2.1.1	INI-C – Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas	24
2.1.2	ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia.....	31
2.2	BIM – Modelagem da Informação da Construção	34
2.2.1	Uso e benefícios de BIM	35
2.2.2	Dificuldades e limitações de BIM	40
2.2.3	ND – Nível de Detalhamento	43
2.2.4	BIM e a etiquetagem do PBE Edifica	45
2.3	Síntese da revisão de literatura.....	47
3	MÉTODO	49
3.1	Fase de exploração	50
3.1.1	Definição da ferramenta de modelagem BIM	50
3.1.2	Definição do objeto de estudo da fase de exploração	51
3.1.3	Condução do estudo exploratório	53
3.1.4	Avaliação e classificação de eficiência energética da envoltória do modelo BIM do objeto de estudo A	58
3.2	Fase de desenvolvimento	60
3.2.1	Definição do objeto de estudo da fase de desenvolvimento.....	60
3.2.2	Idealização das diretrizes de modelagem BIM.....	62
3.2.3	Condução do estudo de caso.....	63

3.2.4	Avaliação e classificação de eficiência energética da envoltória do modelo BIM do Anexo FAUrb	82
3.3	Fase de avaliação	83
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	85
4.1	Considerações sobre o estudo exploratório.....	85
4.2	Considerações sobre o estudo de caso	95
4.3	Avaliação das diretrizes de modelagem BIM	103
5	CONCLUSÕES	109
	REFERÊNCIAS.....	112

1 INTRODUÇÃO

De acordo com *Energy Information Administration* (2017), até 2040 o consumo de energia mundial pode aumentar 1,9% ao ano. Para reduzir o consumo energético e os impactos ambientais os países desenvolvidos têm implementado medidas de eficiência energética (TORREGROSA-JAIME *et al.*, 2018). Uma das medidas mais relevantes é a obrigatoriedade da etiquetagem de eficiência energética em edificações (HARTER *et al.*, 2020).

Os dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2021) demonstram que no Brasil as edificações compõem 51,2% do consumo final de energia elétrica. Frente a esse cenário foram desenvolvidas diversas pesquisas na linha da eficiência energética em edificações, resultando em regulamentos técnicos e instruções normativas que norteiam a avaliação e classificação de eficiência energética das edificações do país (SARTORI; CALMON, 2019).

Uma medida desenvolvida pelo poder público foi a criação do Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica). A partir do PBE Edifica surgiu a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), que demonstra a classe de eficiência energética das edificações a partir de um sistema que varia de “A” (*i.e.* mais eficiente) a “E” (*i.e.* menos eficiente) (INMETRO, 2021a).

Existe a tendência da obrigatoriedade da etiquetagem de eficiência energética no Brasil (EPE, 2020). Conforme a Instrução Normativa nº 02/2014, as novas edificações públicas federais e as antigas que passem por *retrofit* são obrigadas a obterem a ENCE classe A de eficiência energética (BRASIL, 2014). De acordo com a EPE (2020), até 2035 a obtenção da ENCE poderá ser compulsória para todas as novas edificações no Brasil.

1.1 Problema

De acordo com a Portaria nº 372/2013¹ existem dois métodos para avaliar e a eficiência energética das edificações comerciais, de serviços e públicas, são estes: o método prescritivo, um modelo simplificado de cálculo baseado em equações e tabelas; e o método de simulação, baseado em programas computacionais que

¹ Portaria que aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C).

mensuram o consumo de energia e o conforto térmico nas edificações (INMETRO, 2013).

O método de simulação apresenta os resultados mais próximos da realidade, mas requer grandes quantidades de dados de projeto, de profissionais com experiência em ferramentas de simulação e demanda muito tempo para ser executada (MELO, 2012). Para simplificar a avaliação, Carlo (2008) desenvolveu um método baseado na regressão linear múltipla, capaz de avaliar o desempenho térmico da envoltória das edificações de tipologia comercial, de serviços e públicas. O método é baseado em diversas suposições quanto ao clima, padrão de uso, ocupação e tipo de construção (CARLO, 2008).

O método prescritivo demanda menos tempo para ser aplicado em comparação ao método de simulação, mas conforme Melo (2012) e Versage (2015) os resultados entre os métodos podem divergir em até 60%, em decorrência das diversas suposições adotadas pelo método prescritivo. Visando reduzir a lacuna entre os métodos, Melo (2012) desenvolveu um metamodelo simplificado de cálculo, baseado nas redes neurais artificiais, método mais adequado para avaliar a eficiência energética das edificações (MELO *et al.*, 2016).

Os resultados obtidos a partir do metamodelo apresentam maior confiabilidade em comparação aos resultados obtidos pelo método prescritivo. Entretanto, Leite e Hackenberg (2020) afirmam que o método simplificado solicita mais dados de projeto e pode demandar até 30% mais tempo para ser executado, em comparação ao método prescritivo do RTQ-C.

Na avaliação de eficiência energética da envoltória, além da elevada quantidade de dados solicitados, existem outras dificuldades, são estas: erros de detalhamento e omissões de dados de projeto; dificuldade para obter os dados de projeto; elevada demanda de tempo; propensão a erros humanos nas atividades manuais; falta de divulgação da etiquetagem nos veículos de comunicação; e pouca fiscalização por parte das autoridades competentes no cumprimento da obrigatoriedade da etiquetagem (BARROS; CARLO, 2017; GOMES, 2017; OHLWEILER *et al.*, 2019).

A grande quantidade de dados solicitados, em conjunto com as demais dificuldades apresentadas, torna a avaliação de eficiência energética dificultosa para as partes envolvidas no processo. De forma parcial, as dificuldades existentes no

contexto da avaliação de eficiência energética são originadas durante o desenvolvimento dos projetos das edificações.

Eastman *et al.* (2018) afirmam que o processo de projeto convencional é baseado na documentação bidimensional (2D) e caracterizado por fases fragmentadas. A comunicação e a colaboração entre as equipes de projeto são baixas, exigindo mais esforço e tempo para que todas as informações sejam transmitidas as partes interessadas. Soliman *et al.* (2018) afirmam que existem muitas etapas manuais e a tecnologia da informação é pouco utilizada, contribuindo com a ocorrência de erros e omissões de dados durante o desenvolvimento do projeto.

Oliveira, Bittencourt e Dória (2020) afirmam que os problemas existentes no desenvolvimento do projeto são difundidos até a avaliação de eficiência energética, uma das últimas etapas realizadas. Gerrish *et al.* (2017) indagam que a eficiência energética deveria ser considerada nas fases iniciais de projeto, mas para tanto é necessário que o projeto seja desenvolvido de forma integrada e que as partes envolvidas possuam acesso em tempo real às modificações de projeto.

A Modelagem da Informação da Construção (BIM) surge como uma tecnologia promissora, com potencial para ampliar a colaboração e reduzir a ocorrência de erros e omissões ao longo dos projetos das edificações (EASTMAN *et al.*, 2018). A partir das ferramentas de modelagem BIM é possível criar modelos que apresentam elevada riqueza semântica, sendo possível extrair os dados dos elementos dos modelos de forma automática para tabelas e planilhas eletrônicas (KIM; ASL; YAN, 2015; ZEMERO, 2016).

De acordo com a Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2017b), os elementos dos modelos BIM podem ser categorizados pelo Nível de Desenvolvimento (ND). O ND é uma escala que apresenta o grau de confiabilidade e evolução da informação de um elemento que compõe o modelo BIM (MANZIONE, 2013). Quanto maior a quantidade de dados e informações inseridas em determinado elemento, maior o ND (HARTER *et al.*, 2020).

Segunda *European Commission* (2019), diversos países europeus (*i.e.* Dinamarca; Finlândia; Alemanha; Lituânia; Holanda; Reino Unido; França; e Itália) incentivam a utilização da plataforma BIM na construção civil. Patiño-Cambeiro *et al.* (2017) afirmam que em alguns países europeus e nórdicos o uso de BIM em obras públicas é obrigatório.

No Brasil, a utilização de BIM em obras públicas iniciou em 2021, conforme o Decreto nº 10.306/2020 e a Lei nº 14.133/2021 (BRASIL, 2020, 2021). Segundo o Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços (MDIC, 2018), o emprego de BIM nas obras públicas visa garantir maior produtividade, transparência e economicidade, reduzindo o retrabalho e os desperdícios nas construções.

A partir da Instrução Normativa nº 02/2014 e da Lei nº 14.133/2021 é possível afirmar que a avaliação de eficiência energética e o uso de BIM podem convergir. Muitos estudos abordam a associação entre BIM e a simulação termoenergética, demonstrando que esse viés é uma tendência futura (GERRISH *et al.*, 2017; PEZESHKI; SOLEIMANI; DARABI, 2019; HARTEK *et al.*, 2020; BRACHT; MELO; LAMBERTS, 2021). As pesquisas também demonstram que atualmente a integração entre BIM e simulação termoenergética é incipiente, porque a interoperabilidade entre as ferramentas é baixa.

Apesar da limitação entre as ferramentas, a plataforma BIM pode beneficiar a avaliação de eficiência energética a partir da automação de processos (OLIVEIRA *et al.*, 2011; BRACHT, 2016; ZEMERO, 2016; TEIXEIRA *et al.*, 2018; SERRA; FILHO, 2019). A tecnologia BIM reduz o tempo e os erros humanos ao longo da avaliação de eficiência energética (OLIVEIRA; BITTENCOURT; DÓRIA, 2020).

Natividade (2016) indaga que os dados quantitativos obtidos dos modelos BIM podem apresentar problemas de confiabilidade. A autora destaca que a precisão dos valores obtidos está relacionada ao processo de modelagem adotada pelo projetista, que pode resultar na omissão de dados nos modelos BIM.

A interoperabilidade entre as ferramentas BIM e as de simulação termoenergética é baixa, mas é possível avaliar a eficiência energética de edificações desenvolvidas em BIM (ABDI, 2017a). Para tanto, os modelos BIM devem ser elaborados com diretrizes focadas na avaliação de eficiência energética. É suposto que as dificuldades existentes na avaliação de eficiência energética do PBE Edifica podem ser reduzidas a partir do uso da tecnologia BIM. Entretanto, é necessário desenvolver diretrizes de modelagem BIM com foco em na avaliação de eficiência energética.

Segundo Boldrini (2020), o número de projetistas que utilizam BIM aumentou nos últimos anos, fato benéfico para a indústria da construção civil, mas a eficiência energética não foi tão beneficiada. A autora destaca que um dos maiores problemas,

em relação a avaliação de eficiência energética do PBE Edifica, é o desconhecimento dos dados necessários para a avaliação, por parte dos projetistas.

Mesmo com o uso de BIM nos projetos, se não existirem diretrizes de modelagem BIM com foco na avaliação de eficiência energética, o problema das dificuldades existentes no processo continuará a existir. É necessário analisar a aplicabilidade de BIM no contexto da avaliação de eficiência energética do PBE Edifica. Nessa pesquisa, destaca-se a avaliação da envoltória pelo método simplificado da INI-C, principal vertente avaliada e, também, a mais trabalhosa.

1.2 Questões de pesquisa

Em virtude da ascensão do uso de BIM e com base nos problemas existentes na avaliação de eficiência energética, foi formulada a seguinte questão primária de pesquisa:

- a) Como a plataforma BIM pode ser utilizada a favor da avaliação de eficiência energética da envoltória?

Também foram formuladas as seguintes questões secundárias:

- a) Quais os benefícios e as dificuldades existentes na associação de BIM com a avaliação de eficiência energética da envoltória?
- b) Quais requisitos mínimos um modelo BIM precisa para que a avaliação da envoltória pelo método simplificado possa ser realizada?

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a aplicação de BIM na avaliação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C.

1.3.2 Específicos

- a) Avaliar os benefícios e as limitações do uso de BIM na avaliação de eficiência energética da envoltória;
- b) Propor diretrizes de modelagem para o desenvolvimento de modelos BIM com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória;
- c) Especificar requisitos mínimos para modelos BIM alvos da avaliação de eficiência energética da envoltória.

1.4 Estrutura

Esta dissertação foi dividida em cinco seções. A primeira seção contextualizou o tema e apresentou o problema e os objetivos de pesquisa. A segunda seção apresentou a revisão de literatura, fase em que foi realizado o levantamento do conhecimento teórico sobre os temas abordados. A terceira seção contemplou o método de pesquisa utilizado para atingir os objetivos. A quarta seção apresentou os resultados obtidos a partir da aplicação do método. A quinta seção expôs as conclusões observadas na dissertação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Eficiência energética em edificações

A EPE (2021) demonstra que o setor de edificações, composto pelas tipologias residenciais (27,6%), comerciais (15,7%) e públicas (7,9%), é responsável pelo consumo de 51,2% da energia elétrica no Brasil. A Figura 1 demonstra que o consumo de energia no Brasil está aumentando gradativamente ao longo das décadas.

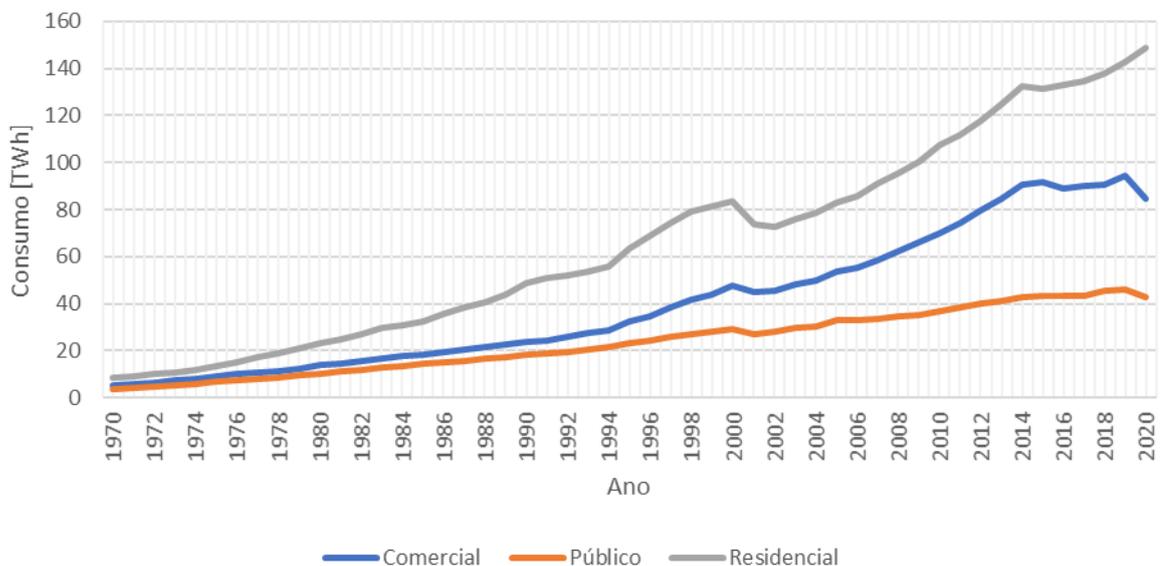


Figura 1 - Gráfico do consumo final de energia elétrica do setor de edificações no Brasil
Fonte: Adaptado de EPE, 2021.

A partir da consideração da eficiência energética na fase de projeto, um edifício pode apresentar uma redução de até 50% no consumo de energia na fase operacional, se comparado com uma edificação que não possui tais premissas (OLIVEIRA, 2018). Além de proporcionar economia financeira aos proprietários das edificações, a aplicação da eficiência energética também reduz os impactos socioambientais associados à ampliação das fontes da matriz energética (WESTPHAL, 2007).

As iniciativas do poder público são relevantes para o desenvolvimento e implementação de medidas relacionadas ao tema da eficiência energética em edificações (EPE, 2020). A etiquetagem compulsória de eficiência energética é uma medida recente no Brasil, implementada primeiramente no contexto das edificações públicas federais a partir da Instrução Normativa nº 02/2014 (BRASIL, 2014).

Conforme a nota técnica publicada pela EPE (2020), a etiquetagem compulsória é uma medida prioritária dentro do escopo das principais ações identificadas para o tema da eficiência energética no país. Na proposta idealizada, a etiquetagem compulsória entrará em vigor a partir de 2025 para edificações comerciais e a partir de 2030 para edificações residenciais.

Para realizar a etiquetagem é necessário avaliar e classificar a eficiência energética das edificações a partir dos regulamentos técnicos da qualidade e das instruções normativas do Inmetro. Para as edificações comerciais, de serviços e públicas – foco desta pesquisa – é utilizada a INI-C.

2.1.1 INI-C – Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

A INI-C é o resultado de uma série de pesquisas realizadas pelo Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (Procel Edifica) em conjunto com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E). A nova instrução normativa visa aperfeiçoar o método de avaliação e classificação de eficiência energética das edificações comerciais, de serviços e públicas.

Conforme o Inmetro (2021a), dentre os fatores que culminaram na necessidade de um novo método, destacam-se: o indicador de desempenho do método prescritivo (*i.e.* Equivalente Numérico), que não fornece uma ideia de grandeza relacionada ao consumo real da edificação; e a discrepância entre os resultados do método prescritivo e do método de simulação.

Em virtude das limitações do RTQ-C, a INI-C passou a adotar a energia primária como indicador de desempenho pois essa considera a eficiência de toda a cadeia de transformação da energia. A partir da consideração da energia primária, sistemas que possuem a mesma finalidade (*e.g.* chuveiro elétrico e aquecedor de passagem), mas que utilizam fontes de energia distintas, podem ser comparados a partir de fatores de conversão (LAMBERTS; CLETO, 2018).

A classificação de eficiência energética é realizada em função do desempenho térmico da envoltória e do consumo de energia primária (C_{EP}) dos equipamentos e sistemas (*i.e.* condicionamento de ar, iluminação e aquecimento de água). Um dos principais aspectos da INI-C, em comparação ao RTQ-C, é o novo método simplificado

que conta com dois metamodelos, um para edificações condicionadas artificialmente e outro para edificações ventiladas naturalmente ou híbridas.

Melo *et al.* (2016) aplicaram diversos métodos estatísticos (*i.e.* regressão linear múltipla; regressão adaptativa multivariada por *splines*; máquinas de vetores de suporte; processo Gaussiano; *Random Forest*; e redes neurais artificiais) para gerar um metamodelo capaz de calcular a carga térmica de refrigeração de edificações comerciais. As redes neurais artificiais apresentaram os melhores resultados, com variações abaixo de 1% em relação aos resultados da simulação termoenergética. Outras pesquisas demonstram que a variação pode atingir até 10% (FONSECA, 2015; LI *et al.*, 2019).

O objetivo da avaliação é determinar a carga térmica da envoltória e o consumo de energia primária dos sistemas e equipamentos na edificação. Para tanto, é necessário avaliar dois casos: um considerando o consumo de energia primária da edificação real ($C_{EP,real}$) e outro considerando o consumo de energia primária da edificação de referência ($C_{EP,ref}$) (*i.e.* características da classe D de eficiência energética).

Os parâmetros e as características da condição de referência constam no Anexo A da INI-C e englobam as seguintes tipologias de edificações: escritório; educacional, hospedagem; assistencial de saúde; varejo; alimentação; e outros. A partir da comparação entre a condição real e de referência, é possível determinar a classe de eficiência energética da edificação real.

O método de simulação também pode ser utilizado conforme estipulado pela INI-C. A partir de programas de simulação (*e.g.* *EnergyPlus*) é mensurado o consumo de energia das condições real e de referência. Os valores de consumo são utilizados em conjunto com as equações e tabelas para classificar a eficiência energética da edificação.

2.1.1.1 Método simplificado para a avaliação da envoltória

Para a aplicação do método simplificado, a edificação deve atender a determinados limites e requisitos, caso contrário o método de simulação deve ser adotado. A Tabela 1 apresenta os limites de aplicabilidade do método simplificado para edificações condicionadas artificialmente.

Tabela 1 - Limites de aplicabilidade do método simplificado para edificações condicionadas artificialmente

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
Absortância solar da cobertura	0,2	0,8
Absortância solar da parede	0,2	0,8
Ângulo de obstrução vizinha	0°	80°
Ângulo horizontal de sombreamento	0°	80°
Ângulo vertical de sombreamento	0°	90°
Capacidade térmica da cobertura	0,22 kJ/m ² .K	450 kJ/m ² .K
Capacidade térmica da parede externa	0,22 kJ/m ² .K	450 kJ/m ² .K
Densidade de potência de equipamentos	4 W/m ²	40 W/m ²
Densidade de potência de iluminação	4 W/m ²	40 W/m ²
Fator solar do vidro	0,21	0,87
Pé-direito	2,6 m	6,6 m
Percentual de abertura da fachada	0%	80%
Transmitância térmica da cobertura	0,51 W/m ² .K	5,07 W/m ² .K
Transmitância térmica da parede externa	0,50 W/m ² .K	4,40 W/m ² .K
Transmitância térmica do vidro	1,90 W/m ² .K	5,70 W/m ² .K

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021b.

O método de simulação também deve ser utilizado caso a edificação avaliada apresente alguma das seguintes características: aberturas zenitais; vidro em frente das paredes da fachada; fachadas ventiladas; ambientes de elevada geração de carga interna; dispositivos móveis de sombreamento interno automatizados; sistema de aquecimento ambiental; vidros com comportamento dinâmico; ou outras soluções de desempenho inovadoras (INMETRO, 2021b).

O método simplificado também pode ser utilizado em edificações que consideram a ventilação natural (*i.e.* edificações híbridas ou totalmente ventiladas naturalmente), mas devem atender aos limites apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de aplicabilidade do método simplificado para edificações híbridas ou totalmente ventiladas naturalmente

Parâmetro	Limite mínimo	Limite máximo
Absortância solar da cobertura	0,2	0,8
Absortância solar das paredes externas	0,2	0,8
Ângulo vertical de sombreamento	0°	45°
Área de permanência prolongada	9 m ²	400 m ²
Capacidade térmica da cobertura	10 kJ/m ² .K	400 kJ/m ² .K
Capacidade térmica da parede externa	40 kJ/m ² .K	500 kJ/m ² .K
Comprimento total	13 m	200 m
Fator da área da escada	0	0,28
Fator solar do vidro	0,2	0,8
Razão entre a largura e a altura das aberturas para ventilação	0,1	50
Número de pavimentos	1	5
Pé-direito	2,75 m	4,25 m
Percentual de área de abertura na fachada total	0,05	0,70
Profundidade total	8 m	50 m
Transmitância térmica da parede externa	0,1 W/m ² .K	5,0 W/m ² .K
Transmitância térmica da cobertura	0,1 W/m ² .K	5,0 W/m ² .K
Transmitância térmica do vidro	1,0 W/m ² .K	6,0 W/m ² .K

Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021b.

Os requisitos apresentados a seguir também precisam ser atendidos para que a avaliação de edificações híbridas ou totalmente ventiladas naturalmente possa ser realizada pelo método simplificado:

- a) situada em uma cidade abrangida pela interface do metamodelo² para edificações híbridas ou ventiladas naturalmente;
- b) tipologia escolar ou de escritório;
- c) geometria quadrada ou retangular e altura máxima de 16 metros;
- d) horários de ocupação em concordância com o Anexo A da INI-C;
- e) espaços internos com divisão e metragem quadrada similares, com variação não superior a 10%;
- f) aberturas para ventilação em todas as áreas de permanência prolongada.

Caso a edificação atenda aos limites de aplicação do método simplificado, o primeiro passo é delimitar as zonas térmicas da edificação. As zonas térmicas devem ser separadas de acordo com a tipologia da edificação; tipo de sistema de condicionamento de ar; pé-direito; espaços com piso em contato com o solo ou exterior; e espaços com cobertura exposta. As áreas de permanência transitória não condicionadas de edificações condicionadas artificialmente devem ser desconsideradas da avaliação. A INI-C (INMETRO, 2021b, p. 75) afirma o seguinte quanto a divisão das zonas térmicas:

As zonas térmicas internas são localizadas em espaços além dos 4,50 m de profundidade com relação à face interna da parede externa, e sua área total pode também incluir as áreas ocupadas pelas paredes internas que dividem os ambientes, caso existentes. Quando a largura ou o comprimento do espaço a ser analisado for inferior a 9,00 m, têm-se apenas zonas perimetrais [...]

A Figura 2 demonstra os tipos de divisões de zonas térmicas (*i.e.* perimetral e interna; e apenas perimetral).

² <http://pbeedifica.com.br/naturalcomfort>

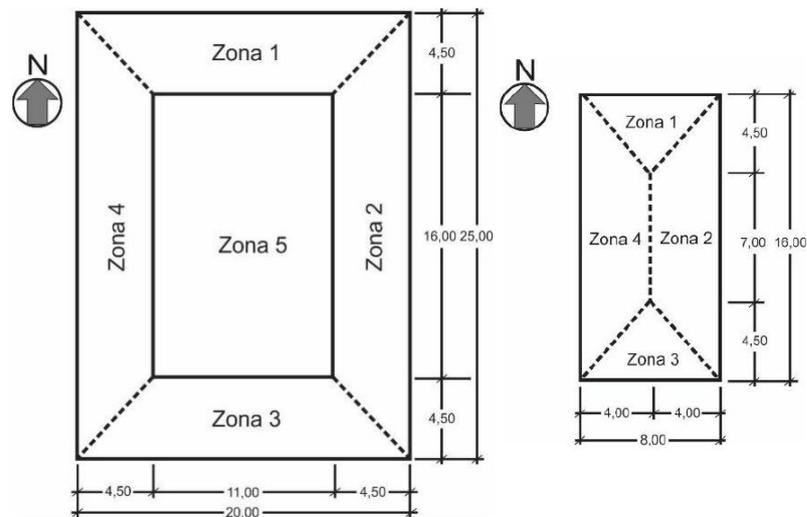


Figura 2 - Exemplo de divisão de zonas térmicas pelo método simplificado da INI-C
Fonte: INMETRO, 2021b.

Após a definição das zonas térmicas, é necessário utilizar a Interface Web do metamodelo³. Na interface, para cada zona térmica, são inseridos 23 dados, são estes:

- a) Área da zona térmica [m²];
- b) Tipo de zona térmica;
- c) Se existe contato com o solo;
- d) Se a cobertura é voltada para o exterior;
- e) Existência de isolamento térmico no piso;
- f) Orientação solar;
- g) Horas de ocupação por dia;
- h) Densidade de potência de equipamentos [W/m²];
- i) Densidade de potência de iluminação [W/m²];
- j) Percentual de abertura de fachada da zona térmica [%];
- k) Fator solar do vidro;
- l) Transmitância térmica do vidro, cobertura e paredes externas [W/m².K];
- m) Absortância solar da cobertura e paredes externas;
- n) Pé-direito [m];
- o) Ângulo horizontal de sombreamento [°];

³ http://pbeedifica.com.br/redes/comercial/index_with_angular.html

- p) Ângulo vertical de sombreamento [°];
- q) Ângulo de obstrução vizinha [°];
- r) Capacidade térmica da cobertura e paredes externas [kJ/m²K].

O cálculo realizado pelo metamodelo resulta na densidade de carga térmica para refrigeração (DCgTR) para cada uma das zonas e, também, no valor da carga térmica de refrigeração anual (CgTR), utilizado posteriormente para calcular a carga térmica total anual (CgTT) e para classificar a eficiência da envoltória da edificação. A CgTT é calculada a partir da Equação 1.

$$CgTT = CgTR \cdot FH_{desc} \quad (1)$$

Onde:

CgTT é a carga térmica total anual da edificação [kWh/ano];

CgTR é a carga térmica de refrigeração anual da edificação [kWh/ano];

FH_{desc} é a fração de horas excedentes por calor em relação às horas de ocupação [%].

Para edificações híbridas ou totalmente ventiladas naturalmente, a envoltória deve ser avaliada em função do percentual de horas ocupadas em conforto térmico (PHOCT). Para tanto, é utilizada a interface⁴ específica para edificações que consideram a ventilação natural. O metamodelo resulta na fração de horas excedentes por calor em relação às horas de ocupação (FH_{desc}) na edificação. O PHOCT é calculado a partir da Equação 2.

$$PHOCT = 100 - FH_{desc} \quad (2)$$

Onde:

PHOCT é o percentual de horas ocupadas em conforto térmico [%];

FH_{desc} é a fração de horas excedentes por calor em relação às horas de ocupação [%].

Caso o PHOCT seja inferior a 90%, é necessário apresentar um projeto de sistema de condicionamento artificial que proporcione conforto nas horas em que

⁴ <<http://pbeedifica.com.br/naturalcomfort>>

apenas a ventilação natural não é o suficiente. Também é necessário calcular a CgTT da condição real para as horas não atendidas de conforto térmico. Para a condição de referência, a ventilação natural não é considerada, assim o valor da CgTT da condição de referência é igual ao valor da CgTR.

Caso o PHOCT seja igual ou superior a 90%, não é necessário calcular a CgTT e a envoltória obtém a classe A de eficiência energética, não sendo necessário realizar outros procedimentos em relação a avaliação da envoltória. Em suma, o desempenho da envoltória é eficiente ao ponto de não ser necessário um sistema de condicionamento artificial na edificação.

2.1.1.2 Classificação da envoltória

Obtida a carga térmica total anual para a condição real ($CgTT_{real}$) e para a condição de referência ($CgTT_{ref}$), é determinada a classe de eficiência energética da envoltória. O primeiro passo é calcular o fator de forma (FF) da edificação, a partir da divisão da área da envoltória (A_{env}) pelo volume total construído da edificação (V_{tot}). Em seguida é preciso obter o coeficiente de redução da carga térmica total anual da classificação D para a A ($CRCgTT_{D-A}$). Esse parâmetro – tabelado pela INI-C – relaciona o FF com o grupo climático em que a edificação está situada. É necessário determinar o valor do “coeficiente i” a partir da Equação 3.

$$i = \frac{CgTT_{ref} \cdot CRCgTT_{D-A}}{3} \quad (3)$$

Onde:

i é o coeficiente que representa os intervalos entre as classes;

$CgTT_{ref}$ é a carga térmica total da edificação em sua condição de referência [kWh/ano];

$CRCgTT_{D-A}$ é o coeficiente de redução de carga térmica anual da classificação D para a A.

Com o “coeficiente i” é possível identificar os limites entre os intervalos das classes de eficiência energética da envoltória e comparar a $CgTT_{real}$ com os limites calculados.

Classe	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> C_{gTTref} - 3.i$	$> C_{gTTref} - 2.i$	$> C_{gTTref} - i$	$> C_{gTTref}$
Limite inferior	$\leq C_{gTTref} - 3.i$	$\leq C_{gTTref} - 2.i$	$\leq C_{gTTref} - i$	$\leq C_{gTTref}$	-

Quadro 1 - Limites de classificação de eficiência energética da envoltória

Fonte: INMETRO, 2021b.

2.1.2 ENCE – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia

A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) demonstra a classe de eficiência energética das edificações, avaliadas de acordo com os regulamentos técnicos da qualidade e as instruções normativas do Inmetro (INMETRO, 2021a). Para adquirir a ENCE é necessário contatar um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA) pelo Inmetro e solicitar o início do processo de etiquetagem. O OIA verifica se os documentos enviados pelo solicitante estão de acordo com os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações (RAC) (INMETRO, 2021a).

A primeira etapa da etiquetagem consiste na inspeção de projeto da edificação. Caso não existam inconsistências nos documentos, o OIA realiza a inspeção de projeto e encaminha ao Inmetro as cópias dos documentos do solicitante, o relatório e a planilha de inspeção e a ENCE de projeto, válida até a conclusão da obra ou até cinco anos a partir da data de emissão (INMETRO, 2021a).

A ENCE de edificações comerciais, de serviços e públicas (Figura 3) demonstra a classe de eficiência energética da edificação considerando também a eficiência da envoltória e dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar. A classificação da ENCE também leva em consideração as bonificações, que são soluções que proporcionam eficiência energética ao edifício avaliado.



Figura 3 - Modelo da ENCE de projeto para edificações comerciais, de serviços e públicas
 Fonte: INMETRO, 2013.

Após o término da obra é realizada a inspeção in loco para determinar se a edificação foi executada conforme os projetos avaliados na inspeção de projeto. Caso exista alguma divergência que ultrapasse os limites de tolerância apresentados pelo RAC é necessário avaliar e classificar a eficiência energética da edificação com base no projeto as built (INMETRO, 2021a).

Conforme o Quadro 2, existem seis OIAs registrados no Inmetro, entretanto apenas três desses estão em situação ativa e podem avaliar a eficiência energética das edificações e emitir a ENCE.

Organismo	Localização	Situação
Fundação Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras	Florianópolis/SC	Cancelado
Fundação Carlos Alberto Vanzolini	São Paulo/SP	Ativo
Universidade Federal de Pelotas	Pelotas/RS	Ativo
Quali-A Conforto Ambiental e Eficiência Energética	Brasília/DF	Suspensão
Universidade Federal do Rio Grande do Norte	Natal/RN	Cancelado
HABT Edifício Eficiente Arquitetos	Natal/RN	Ativo

Quadro 2 - Relação dos OIAs
 Fonte: Adaptado de INMETRO⁵.

⁵ http://www.inmetro.gov.br/organismos/resultado_consulta.asp

O baixo número de OIAs está relacionado à falta de divulgação da ENCE nos veículos de comunicação e, também, à ausência de medidas legislativas mais rígidas; no contexto do cumprimento da Instrução Normativa nº 02/2014 (GOMES, 2017). Os aspectos apresentados resultam na baixa demanda da ENCE e, conseqüentemente, de OIAs. Outro aspecto destacado pelo autor é a dificuldade de treinamento de profissionais, visto que a avaliação de eficiência energética é um processo complexo.

A simulação computacional é mais complexa em comparação ao método prescritivo, exigindo domínio em ferramentas de simulação e demandando mais tempo e dados de projeto, encarecendo o serviço para a obtenção da ENCE (RIBEIRO, 2016). Frente ao cenário apresentado, o método prescritivo é mais utilizado e os dados do Inmetro⁶ corroboram com essa afirmação, demonstrando que o método prescritivo foi utilizado em 84% das avaliações de tipologias comerciais, de serviços e públicas e em 98% das avaliações de tipologia residencial.

Apesar do método prescritivo ser o mais utilizado, existem limitações de aplicação e imperfeições em sua estrutura. Os resultados obtidos do modelo simplificado de cálculo na avaliação da envoltória podem ser discrepantes dos resultados da simulação; e a classificação pelo método prescritivo é baseada em índices sem relação direta com o consumo de energia da edificação (MELO, 2012).

Constatadas as limitações do método prescritivo, foi desenvolvido um novo modelo simplificado de cálculo e um novo método de classificação, que adotou o consumo de energia primária como principal parâmetro de avaliação (INMETRO, 2021b). O Inmetro (2021a), apresenta um novo modelo de ENCE, tendo em vista que o método de classificação de eficiência energética adotado pela INI-C considera parâmetros distintos do RTQ-C.

O novo modelo da ENCE (Figura 4) apresenta o consumo de energia primária, elétrica e térmica dos sistemas avaliados (*i.e.* iluminação; condicionamento de ar; água quente; e equipamentos) em Quilowatt-hora por mês (kWh/mês). Também é informada a geração de energia renovável, emissões de dióxido de carbono e a economia do uso racional de água. O desempenho da envoltória é demonstrado a partir da carga térmica de resfriamento e(ou) do percentual de horas ocupadas em conforto térmico.

⁶ <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/edificacoes.asp>

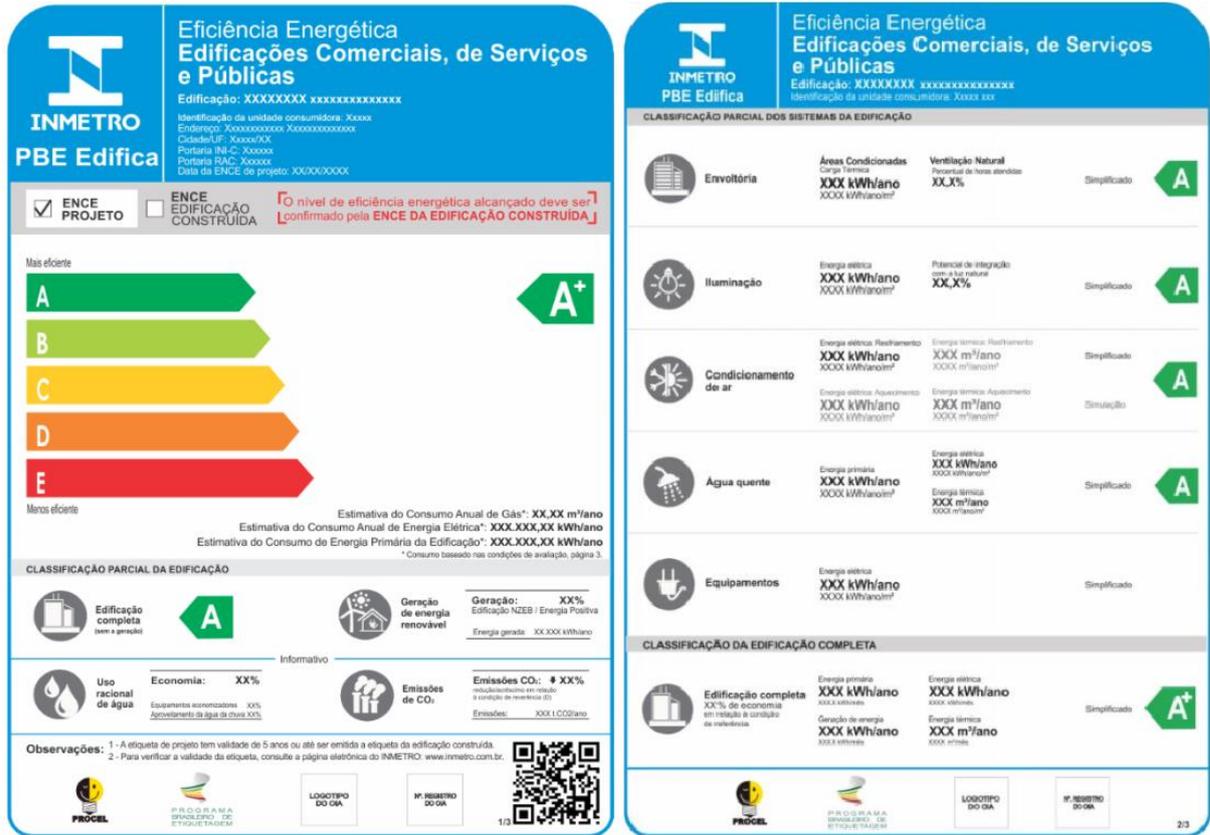


Figura 4 - Novo modelo de ENCE de projeto para edificações comerciais, de serviços e públicas
 Fonte: Adaptado de INMETRO, 2021a.

2.2 BIM – Modelagem da Informação da Construção

A Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling – BIM*) é originada da associação entre o processo de projeto e a tecnologia da informação (EASTMAN *et al.*, 2018). Segundo Gaspar e Ruschel (2017), BIM é considerado um paradigma na forma de projetar e não é conceituado de forma unânime na literatura.

A Administração de Serviços Gerais (*General Services Administration – GSA*) (2007) conceitua BIM como um processo de desenvolvimento e uso de ferramenta de modelagem de dados para documentar o projeto e simular a construção e operação do edifício. O resultado do processo é um modelo tridimensional (3D), rico em dados e informações, baseado em objetos, inteligente e com representação digital paramétrica.

Succar (2009) afirma que BIM, mais do que um processo respaldado por software, é um conjunto interligado de processos, tecnologias e políticas. Como processo, BIM engloba o projeto, a construção, a fabricação, o uso e a manutenção do edifício. Como tecnologia, envolve o desenvolvimento e suporte das ferramentas

BIM, sistemas de comunicação e armazenamento de dados. Como política, aborda diretrizes, regulamentos, requisitos, projetos de pesquisa e incentivos à educação.

Isikdag e Underwood (2010) conceituam BIM como um processo baseado em modelos digitais interoperáveis denominados *Building Information Models*. Os autores concluem que *Building Information Modeling* pode ser definido como um processo de gerenciamento da informação, enquanto *Building Information Models* são modelos 3D, semanticamente ricos, que formam o processo BIM.

Eastman *et al.* (2018) definem BIM como uma tecnologia para a criação de modelos digitais. Os modelos BIM são um conjunto de objetos paramétricos que formam uma representação digital do edifício, com elevada riqueza semântica. Ainda segundo os autores, a representação digital permite que o processo de projeto e de construção sejam mais integrados e que os edifícios apresentem maior qualidade e menor custo e prazo de execução.

2.2.1 Uso e benefícios de BIM

Na obra *Green BIM* de Krygiel e Nies (2008), são demonstrados os três benefícios básicos advindos da utilização de BIM:

- a) primeiramente é apresentada a comparação entre a simulação 3D e a representação 2D. Nas abordagens tradicionais de projeto são utilizados documentos 2D para a representação de elementos 3D, o que comumente ocasiona omissões de informações e erros de projeto. No uso de BIM é possibilitada a simulação 3D da edificação e de seus componentes, permitindo identificar incompatibilidades entre disciplinas de projeto;
- b) o segundo benefício destacado é a questão da precisão versus estimativa. Por intermédio da modelagem virtual detalhada do edifício e de seus componentes, BIM proporciona um alto nível de precisão no projeto e na qualidade da construção. O quantitativo de materiais e as variáveis ambientais, ao invés de estimadas, podem ser demonstradas em tempo real através da extração de dados e da simulação do modelo BIM;
- c) o terceiro benefício reside na questão da eficiência versus redundância. Os benefícios apresentados proporcionam um nível maior de eficiência nos projetos desenvolvidos em BIM. A modelagem BIM permite que a geração e

documentação dos cortes, planos e vistas sejam realizadas de forma automatizada, mitigando possíveis omissões e redundâncias de projeto.

Segundo Eadie *et al.* (2013) e Ghaffarianhoseini *et al.* (2016), uma das principais vantagens da tecnologia BIM é a abrangência de dados e informações intrínsecas aos modelos virtuais. A riqueza semântica de dados é elevada, permitindo a obtenção de dados e informações dos objetos que constituem o modelo (e.g. materiais, quantidades, custos, dentre outros). A tecnologia BIM permite que diferentes profissionais trabalhem de forma simultânea em um mesmo modelo, potencializando a resolução prévia de problemas e reduzindo os custos e desperdícios no processo de desenvolvimento do projeto e do edifício.

No exemplar *BIM Handbook* de Eastman *et al.* (2018) é demonstrado que BIM proporciona benefícios em todas as fases do ciclo de vida do edifício:

- a) concepção: o estudo preliminar é aprimorado pela integração e gestão colaborativa entre as partes interessadas, aumentando a qualidade e o desempenho da construção;
- b) projeto: visualização precisa do modelo 3D; correção automática dos elementos do modelo quando são efetuadas alterações no projeto; geração automática de cortes e vistas; facilidade na conferência dos requisitos de projeto; automação da obtenção de alguns dados; incrementação da eficiência energética nas etapas iniciais de projeto;
- c) execução: sincronização entre o cronograma da obra e o modelo BIM; verificação de conflitos entre elementos do projeto antes da construção; potencialização dos conceitos de construção enxuta e de sustentabilidade;
- d) operação: aprimoramento do comissionamento e gerenciamento da operação de sistemas do edifício construído.

Tavares (2011) utilizou o Revit para extrair os dados solicitados na avaliação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C. O método desenvolvido pelo autor possibilitou que os dados presentes no modelo fossem extraídos diretamente do Revit para planilhas eletrônicas. Os dados, necessários na avaliação, não contemplados pelo modelo, foram inseridos em parâmetros criados manualmente no Revit.

Park *et al.* (2012) desenvolveram uma interface para avaliar o desempenho energético de modelos desenvolvidos no Revit. A avaliação foi baseada no índice de eficiência energética da Coreia do Sul. A interface utiliza dados da geometria do modelo BIM em conjunto com valores inseridos manualmente pelo projetista para efetuar o cálculo do índice de desempenho energético do modelo.

Mytafides, Dimoudi e Zoras (2017) utilizaram o Revit em conjunto com ferramentas de análise energética (*i.e.* *Green Building Studio*; *Ecotect*; *Lighting Analysis*; *Solar Analysis*; e *Computational Fluid Dynamics*) para avaliar o desempenho da envoltória e dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar de um edifício. A partir da avaliação foram elaboradas estratégias de eficiência energética.

Farooq, Sharma e Kumar (2018) utilizaram a linguagem de programação C# para desenvolver um *add-in* para Revit. O artefato fornece a potência total e em metros quadrados dos componentes do sistema elétrico do modelo BIM (*i.e.* iluminação; pontos de tomada de energia; e condicionadores de ar). O *add-in* também demonstra a estimativa da fatura mensal de energia e o custo para a construção do sistema elétrico.

Zhou e Azar (2019) empregaram o Dynamo – interface de programação visual integrada ao Revit – para extrair dados do projeto estrutural do modelo BIM. Os dados extraídos foram utilizados para calcular a emissão de carbono e a energia necessária para fabricar os elementos do sistema estrutural do edifício. Foi calculado o número de horas em maquinário necessárias para construir a superestrutura da edificação.

Tushar *et al.* (2019) investigaram como a resistência térmica da envoltória, estipulada pelos regulamentos australianos, influencia na emissão de carbono, no consumo energético e na fatura mensal de energia, em oito climas distintos da Austrália. O Revit foi utilizado para modelar uma edificação residencial e extrair os dados necessários para calcular a emissão de carbono, consumo energético e inflação no preço da energia.

Sartori e Calmon (2019) utilizaram o ArchiCAD para modelagem e extração de dados de um modelo BIM. Os dados extraídos foram utilizados para calcular a emissão de carbono e energia embutida no ciclo de vida das edificações. Também foi realizada a avaliação de eficiência energética pelas diretrizes do RTQ-R.

Chang *et al.* (2019) adotaram o Revit para desenvolver e extrair dados de um modelo BIM. Os dados obtidos foram utilizados para analisar a emissão de carbono e

energia embutida no ciclo de vida da edificação desenvolvida em BIM. A partir das análises foram elaboradas estratégias de eficiência energética.

Akhanova *et al.* (2020) desenvolveram um modelo analítico para avaliar a sustentabilidade de edificações. Foram determinados os indicadores de sustentabilidade do modelo e foi realizada uma comparação dos pesos dos indicadores com sistemas existentes (e.g. *LEED*). A tecnologia BIM será utilizada na próxima etapa da pesquisa para automatizar a certificação de sustentabilidade proposta pelo modelo analítico

As pesquisas demonstram que BIM pode ser utilizado de diversas formas para beneficiar a avaliação de eficiência energética em edificações, a partir da extração de dados de projeto, diretamente pela interface do programa de modelagem (TAVARES, 2011; CHANG *et al.*, 2019; SARTORI; CALMON, 2019; TUSHAR *et al.*, 2019). Outras pesquisas utilizaram BIM em diferentes contextos, tais como: verificação automatizada de requisitos de projeto (AKHANOVA *et al.*, 2020); automação parcial do projeto elétrico (FAROOQ; SHARMA; KUMAR, 2018); e análise de eficiência energética (PARK *et al.*, 2012; MYTAFIDES; DIMOUDI; ZORAS, 2017).

A plataforma BIM oportuniza a integração da avaliação de eficiência energética com as fases iniciais de projeto (MYTAFIDES; DIMOUDI; ZORAS, 2017). Esse é o cenário ideal visto que são nessas fases que as alterações de projeto possuem o maior impacto nos custos e nas capacidades funcionais do edifício (MANZIONE, 2013).

Alwan e Gledson (2015) indagam que a aplicação de BIM na avaliação de eficiência energética pode minimizar a perda de dados decorrente de erros e omissões ao decorrer do desenvolvimento do projeto. Em contrapartida, os autores destacam que durante o processo de projeto tradicional ocorrem perdas de dados e informações durante as transições das fases de projeto, conforme ilustra a Figura 5.

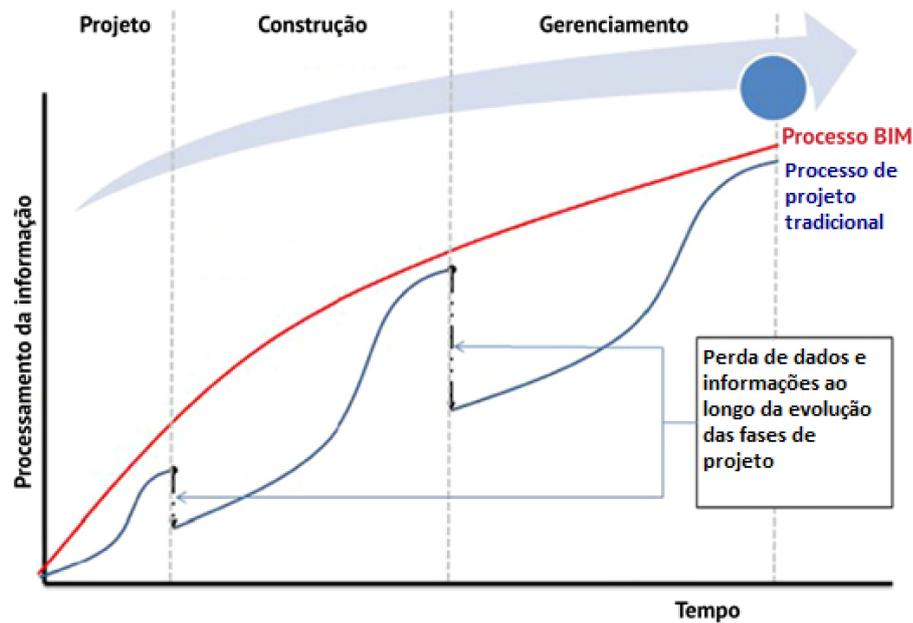


Figura 5 - Gráfico do processamento da informação no processo BIM e no processo de projeto tradicional
 Fonte: Adaptado de ALWAN; GLEDSON, 2015.

Eastman *et al.* (2018) afirmam que nem todos os benefícios proporcionados pela tecnologia BIM são logrados. Neste aspecto, é importante observar o conceito apresentado por Krygiel e Nies (2008, p. 34, tradução nossa), onde “[...] BIM é uma metodologia de refinamento contínuo, não uma mudança drástica. O sucesso ocorre pela evolução, não pela revolução [...]”. Nesse sentido, o Quadro 3 apresenta os estágios evolutivos de BIM propostos por Succar (2009).

Estágio	Descrição
BIM 0 (Pré-BIM)	Estágio singularizado pela dependência em documentos 2D para descrever objetos 3D. O desenvolvimento do projeto é sequencial e fragmentado e a gestão colaborativa entre as partes interessadas é baixa. O estágio BIM 0 apresenta problemas de segregação das fases de projeto e falta de investimentos em tecnologia da informação.
BIM 1	Implementação inicial BIM a partir de ferramentas de modelagem (e.g. Revit). Os modelos das disciplinas de projeto são desenvolvidos individualmente e de forma desconexa. Os produtos dos modelos são a criação automatizada de desenhos (e.g. cortes; plantas; vistas; etc.), visualização 3D e tabelas. Existem problemas similares aos apresentados no estágio BIM 0, ou seja, o desenvolvimento do projeto é linear, assíncrono e não colaborativa.
BIM 2	Início da colaboração entre projetistas por intermédio da interoperabilidade entre ferramentas BIM. A gestão colaborativa ocorre apenas entre duas disciplinas distintas, podendo ocorrer em diferentes fases do ciclo de vida da edificação: “projeto-projeto” (e.g. modelo arquitetônico e estrutural); “projeto-construção” (e.g. modelo estrutural e modelo de fabricação de estruturas metálicas); e “projeto-operação” (e.g. modelo de arquitetura e modelo de gestão de utilidades). Para que ocorram trocas semânticas, um dos modelos precisa conter informações da geometria da edificação. No estágio BIM 2 a comunicação continua a ser assíncrona. Entretanto, surge a necessidade de delimitar de forma mais estrita as responsabilidades entre os membros de projeto, visto que a interação entre os modelos acaba eliminando os documentos tradicionais.

BIM 3	No estágio BIM 3 ocorre a integração dos modelos desenvolvidos no Estágio BIM 2. A gestão colaborativa acontece em todo o ciclo de vida do edifício. A integração é realizada a partir da tecnologia de compartilhamento da informação (e.g. computação em nuvem). O estágio BIM 3 permite a determinação dos custos em todo o ciclo de vida do edifício; a realização de análises complexas nas fases iniciais de projeto; e a implementação dos princípios da construção enxuta e sustentabilidade.
BIM 4 (IPD)	Na perspectiva de Succar (2009), todos os estágios apresentados anteriormente constituem uma linha evolutiva que tem como viés o modelo de gestão Integrated Project Delivery (IPD). Neste estágio emblemático são observadas: integração de pessoas, sistemas e estruturas de negócios e processos; confiança e colaboração entre os membros das equipes de projeto e construção; compartilhamento dos riscos e benefícios; aumento do valor de projeto; redução de gastos; e maximização da eficiência nas fases de projeto, fabricação e construção. Em síntese, o estágio BIM 4 representa um paradigma para a construção civil: a integração plena entre BIM e IPD (ASHCRAFT, 2008; SUCCAR, 2009; MANZIONE, 2013).

Quadro 3 - Estágios evolutivos de BIM
Fonte: Adaptado de SUCCAR, 2009.

2.2.2 Dificuldades e limitações de BIM

Conforme demonstrado, a tecnologia BIM apresenta diversas funcionalidades e vantagens para o desenvolvimento de projetos e também para a temática da eficiência energética em edificações, mas é importante explicitar que existem muitas dificuldades para a implementação de BIM.

Stehling (2012) afirma que as principais dificuldades para a adoção de BIM estão relacionadas ao tempo de treinamento, custos com software, falta de profissionais qualificados e necessidade de colaboração e integração plena entre os projetistas, construtores e fornecedores. Para Manzione (2013, p. 11), um dos maiores problemas reside no quesito pessoas:

O surgimento dos sistemas BIM mostra que um novo paradigma para o trabalho colaborativo precisa ser criado. Porém, em um estágio inicial, observado ainda no Brasil, percebe-se que as equipes de projeto continuam a trabalhar de maneira individual e com trocas de informação somente nos momentos de eventos-chave de compatibilização. Na prática, continua-se trabalhando de forma convencional, sem o aproveitamento dos benefícios possíveis da tecnologia BIM.

De acordo com Silva, Coelho e Melhado (2015), para que BIM seja implementado é necessário alterar a forma de gestão das pessoas, dos processos e das tecnologias. Os autores, a partir de um estudo de caso, identificaram que as principais dificuldades e limitações relatadas por profissionais da construção civil, em relação ao BIM, são estas:

- a) falta de tempo e planejamento para implementar a tecnologia BIM;
- b) escassez de profissionais com experiência em modelagem BIM;
- c) resistência à mudança por parte dos profissionais, principalmente os mais antigos e experientes;
- d) falta de infraestrutura tecnológica (e.g. software; hardware; etc.);
- e) problemas de interoperabilidade entre programas (e.g. Revit; Solid Works; AutoCAD; etc.);
- f) dificuldade de adaptar os elementos e as famílias BIM às normas brasileiras;
- g) arquivos mais pesados em comparação aos oriundos de ferramentas baseadas em Desenho Assistido por Computador (CAD), agravando o quesito da infraestrutura tecnológica;
- h) falhas na gestão e planejamento de projetos.

As dificuldades apresentadas por Silva, Coelho e Melhado (2015) são categorizadas da seguinte maneira: pessoas, tecnologias e fatores de gestão. A ABDI (2017b) afirma que a implementação efetiva de BIM depende destes fundamentos: pessoas, tecnologias e processos. Portanto, os principais fundamentos para que os benefícios de BIM sejam logrados plenamente são, segundo a literatura, as maiores dificuldades para a sua implementação.

Em relação às limitações de BIM, é possível destacar os problemas existentes na precisão dos valores obtidos dos quantitativos dos modelos (MELHADO; PINTO, 2015; NATIVIDADE, 2016). Os autores afirmam que a precisão dos dados obtidos de modelos BIM a partir da extração dos quantitativos podem divergir em função da modelagem BIM; sendo que essa limitação também pode ser observada em projetos desenvolvidos em ferramentas baseadas em Desenho assistido por computador (*Computer-aided design* – CAD).

De acordo com Oliveira e Santos (2019), nem sempre todas as informações contidas em um modelo BIM são confiáveis, portanto, a validação de dados e informações por parte do usuário pode ser necessária em certos casos. Outro aspecto limitante – corroborando com a afirmação de Oliveira e Santos (2019) – reside na forma como as ferramentas BIM realizam determinados processos (TAVARES, 2012). Exemplificando, a ferramenta Revit permite a extração da área de vidro das janelas, mas esse dado não poderia ser utilizado na avaliação da envoltória do PBE Edifica,

pois o Revit realiza o cálculo da área de vidro a partir da somatória de todas as faces da folha de vidro (TAVARES, 2012).

A literatura demonstra que uma das maiores limitações de BIM reside na baixa interoperabilidade entre as ferramentas de modelagem e as de simulação termoenergética. Existem ferramentas BIM com extensões que permitem a realização de análises energéticas, mas essas extensões são limitadas e os resultados obtidos apresentam pouca confiabilidade e precisão (MONTIEL-SANTIAGO; HERMOSO-ORZÁEZ; TERRADOS-CEPEDA, 2020).

A ABDI (2017a) afirma que é possível realizar a avaliação de eficiência energética de modelos BIM em ferramentas de simulação termoenergética, mas é necessário que a modelagem BIM seja realizada com foco na avaliação. A fonte também destaca que dependendo da quantidade e da qualidade dos dados inseridos e de como a modelagem foi executada, não é possível avaliar a eficiência energética de um modelo BIM.

Ainda de acordo com a ABDI (2017a), a avaliação de eficiência energética pode não ser possível até mesmo em modelos que apresentam um alto nível de precisão e detalhamento de dados e informações. Boldrini (2020) corrobora com essa afirmação, explanando que desde o princípio do projeto os modelos BIM precisam ser desenvolvidos com um foco muito claro. Por exemplo, um modelo BIM, com elementos muito detalhados e precisos pode conter um número excessivo de dados e informações, que dentro de um contexto específico, precisam ser filtradas. Ademais, é possível que algum dado ou informação necessária para a avaliação de eficiência energética não esteja presente no modelo BIM (BOLDRINI, 2020).

Carvalho, Bragança e Mateus (2020) afirmam que a plataforma BIM possui elevado potencial para ampliar a eficiência energética das edificações. Mas os autores enfatizam a necessidade de procedimentos específicos de modelagem com foco na avaliação de eficiência energética:

As equipes de projeto devem estar cientes de seus objetivos e limitações para que possam executar um processo regular sem possíveis erros e problemas. Uma seleção adequada de métodos pode economizar uma quantidade considerável de tempo [...] e prover os resultados esperados [...] (CARVALHO; BRAGANÇA; MATEUS, 2020, p. 7, tradução nossa).

Carvalho, Bragança e Mateus (2020) idealizaram diretrizes de modelagem para o desenvolvimento de modelos BIM com foco na avaliação energética por simulação termoenergética. As diretrizes permitiram o desenvolvimento de um modelo BIM que

necessitou de menos intervenções manuais ao ser exportado de BIM para Building Energy Modeling (BEM). Os autores corroboraram com outras fontes da literatura, constatando problemas na interoperabilidade entre ferramentas BIM e BEM.

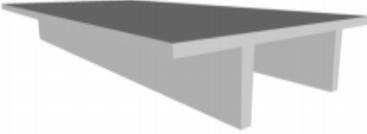
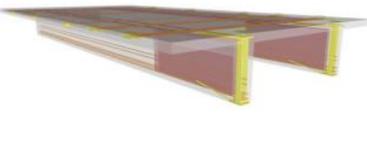
2.2.3 ND – Nível de Detalhamento

O emprego da tecnologia BIM proporciona diversos usos e benefícios, mas também apresenta limitações. É importante que sejam estabelecidos requisitos mínimos para que a tecnologia BIM atenda a um propósito específico (OLIVEIRA, 2016).

Neste aspecto, é apresentado o conceito de Nível de Detalhamento (ND), que representa o grau de complexidade, confiabilidade, detalhamento e quantidade de informações depositadas em determinado elemento do modelo BIM. O conceito de ND foi introduzido inicialmente pelo Instituto Americano de Arquitetos (American Institute of Architects – AIA) (2008), que na ocasião foi apresentado da seguinte maneira: ND 100 (conceitual), ND 200 (geometria aproximada), ND 300 (geometria precisa), ND 400 (fabricação) e ND 500 (as built).

Em 2011, com base nas definições iniciais apresentadas pela AIA (2008), o BIM Forum atualizou as especificações de ND (OLIVEIRA, 2019). A partir da atualização, foi introduzido o ND 350, um nível intermediário que incrementa ao modelo BIM sistemas construtivos (e.g. elétrico; hidrossanitário; dentre outros), possibilitando a detecção de interferências entre elementos de disciplinas distintas. Outro aspecto relevante apresentado por BIM Forum foi a desconsideração do ND 500, por apresentar as mesmas definições do ND 400, sendo a única diferença a verificação in loco. O Quadro 4 demonstra a representação gráfica e a definição de cada ND apresentado por BIM Forum (2019).

ND	Representação	Definição
100		O elemento do modelo pode ser representado como um símbolo que demonstra a existência de um elemento, mas não apresenta tamanho, forma ou localização
200		O elemento do modelo é representado graficamente como um sistema genérico, objeto ou montagem com quantidades aproximadas, tamanho, forma, localização e orientação. Informações não gráficas também podem ser anexadas ao elemento.

300		O elemento do modelo é representado graficamente como um sistema, objeto ou conjunto específico em termos de quantidade, tamanho, forma, localização e orientação. Informações não gráficas também podem ser anexadas ao elemento.
350		O elemento do modelo é representado graficamente como um sistema, objeto ou conjunto específico em termos de quantidade, tamanho, forma, localização, orientação e interfaces com outros sistemas de construção. Informações não gráficas também podem ser anexadas ao elemento.
400		O elemento do modelo é representado graficamente como um sistema, objeto ou conjunto específico em termos de quantidade, tamanho, forma, localização, orientação com detalhes, fabricação, montagem e informações de instalação. Informações não gráficas também podem ser anexadas ao elemento.

Quadro 4 - Representação e descrição dos Níveis de Detalhamento
 Fonte: Adaptado de BIM FORUM, 2019.

Os modelos BIM podem conter diversos elementos com ND distintos, portanto, é incoerente afirmar que modelos BIM possuem ND (ABDI, 2017b). Outro ponto relevante é a diferença entre Nível de Desenvolvimento e Nível de Detalhe:

O ND as vezes é interpretado como Nível de Detalhe em vez de Nível de Desenvolvimento. [...] Existem diferenças importantes. Nível de Detalhe é essencialmente quanto detalhe é incluído no elemento do modelo. Nível de Desenvolvimento é o grau em que o a geometria do elemento e as informações anexadas foram pensadas – o grau em que os membros da equipe do projeto podem confiar nas informações ao usar o modelo. Em essência, o Nível de Detalhe pode ser considerado um input para o elemento, enquanto o Nível de Desenvolvimento é um output confiável [...] (BIM FORUM, 2019, p. 245, tradução nossa).

Outras fontes da literatura demonstram que ND é uma associação entre dois conceitos distintos, o Nível de Detalhe e o Nível de Informação (OLIVEIRA; SANTOS, 2019). O primeiro está associado ao grau de detalhamento geométrico dos elementos do modelo. O segundo está relacionado as informações não gráficas, inseridas nos elementos do modelo.

Gerrish *et al.* (2017) abordam os dados mais relevantes em cada ND no que tange a eficiência energética. No ND 100 e no ND 200 podem ser obtidos dados genéricos da geometria, das agendas de uso e ocupação e das composições de materiais. No ND 300 podem ser obtidos dados precisos da geometria, das agendas de uso e ocupação e das composições dos materiais. No ND 400 podem ser obtidos dados da documentação e do desempenho do projeto. Por fim, no ND 500 são obtidos os dados e as documentações do desempenho, da operação e da manutenção da edificação.

2.2.4 BIM e a etiquetagem do PBE Edifica

A tecnologia BIM permiti o armazenamento de dados e informações referentes a diversas características construtivas do modelo da edificação. A maior parte dos parâmetros necessários na avaliação de eficiência energética do PBE Edifica podem ser obtidos diretamente do modelo BIM, desde que os dados e informações tenham sido inseridas durante a modelagem (ABDI, 2017a).

Oliveira *et al.* (2011) realizaram a avaliação de eficiência energética de uma edificação pelo método prescritivo do RTQ-C e, também, compararam o método convencional em CAD com a plataforma BIM. O modelo foi desenvolvido em um template padrão do Revit, que apresentou famílias de elementos com propriedades térmicas previamente inseridas. Os dados da volumetria foram obtidos diretamente do modelo, mas foi necessário o auxílio de uma planilha de cálculo para concluir a avaliação. Segundo os autores, a ferramenta BIM não mitigou todas as etapas manuais, mas contribuiu positivamente com o processo de etiquetagem.

Tavares (2011) elaborou práticas para avaliar e classificar a envoltória a partir das diretrizes do RTQ-C, utilizando o Revit. O autor utilizou a ferramenta de massa conceitual para obter os dados volumétricos e trabalhou com a manipulação de parâmetros nas famílias dos elementos BIM. A maior parte dos dados foram obtidos diretamente da interface da ferramenta, mas foi necessário utilizar uma planilha de cálculo para concluir a avaliação da envoltória. O autor destaca o potencial que a ferramenta apresenta para a automação da obtenção dos dados necessários na avaliação e etiquetagem.

Ohlweiler *et al.* (2019) utilizaram a ferramenta Revit para exportar os dados necessárias na avaliação da envoltória pelo método prescritivo do RTQ-C para planilhas de Excel. A maior parte dos dados estavam presentes no modelo BIM, mas para a obtenção da área envidraçada foi necessário a inserção de parâmetros nas famílias das esquadrias. As autoras afirmaram que BIM pode auxiliar na obtenção dos dados necessários na etiquetagem do PBE Edifica, mas destacam também a necessidade de calcular manualmente alguns valores, ou seja, não foi possível mitigar completamente os processos manuais.

Oliveira (2019), em sua tese de doutorado, utilizou a linguagem de programação visual em conjunto com o Revit e um script em Phytion para criar uma ferramenta que auxilia na avaliação de eficiência energética de edificações

residenciais. A edificação foi modelada em um template específico para a avaliação, as equações do RTQ-R foram inseridas no código de programação e a execução foi realizada na interface do Revit com auxílio do Dynamo (*i.e.* ferramenta de programação visual). A Figura 6 demonstra os outputs dos ambientes, da envoltória (*i.e.* aquecimento, resfriamento e refrigeração) e da pontuação total gerados pela ferramenta.

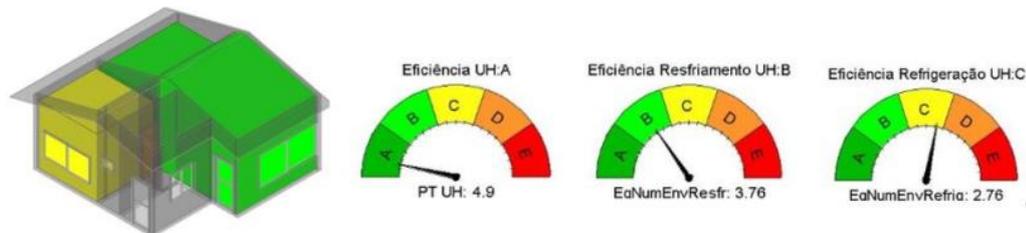


Figura 6 - Output da avaliação de eficiência energética da envoltória
Fonte: Adaptado de OLIVEIRA, 2019.

Boldrini (2020) estudou a aplicação de BIM na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). Foram determinados quais dados podem ser obtidos diretamente de BIM e, também, em que fase do projeto de arquitetura cada um dos dados é definido.

Bracht, Melo e Lamberts (2021) desenvolveram uma ferramenta de integração entre BIM e Building Energy Modeling (BEM), capaz de extrair as variáveis necessárias para a avaliação da INI-R. Assim como Oliveira (2019), os autores utilizaram um script desenvolvido em Python para auxiliar na extração dos dados, sendo esses diretamente relacionados à volumetria do modelo. Outros dados, como as propriedades térmicas e o fator de abertura para a ventilação são definidos pela ferramenta elaborada na pesquisa. O artefato resultante da pesquisa auxilia na integração entre BIM e BEM, mas os autores relataram problemas de interoperabilidade entre os programas. Ademais, foi constatada a necessidade de realizar diversos ajustes manuais antes da exportação de BIM para BEM.

2.3 Síntese da revisão de literatura

Esta seção objetiva auxiliar o leitor na compreensão dos tópicos apresentados na revisão de literatura e como esses estão relacionados. Inicialmente, foi necessário compreender a origem do problema de pesquisa, que engloba a dificuldade prática em avaliar a eficiência energética da envoltória das edificações. Conforme a literatura, a maior dificuldade reside na extração dos dados necessários para a avaliação.

A partir da revisão de literatura foi apresentada a relevância da disciplina de eficiência energética no projeto de edificações, sendo demonstrado que a obrigatoriedade da etiquetagem de eficiência energética é uma tendência global. Foram apresentadas as dificuldades existentes no contexto da etiquetagem de eficiência energética nacional, sendo destacadas: a falta de divulgação da ENCE; o número escasso de OIAs; e a dificuldade de treinamento de novos profissionais, em virtude da complexidade para avaliar a eficiência energética das edificações.

A seção de eficiência energética também aborda as novas diretrizes utilizadas no Brasil para avaliar a eficiência energética das edificações (INI-C). Foi demonstrado que embora o método de simulação apresente resultados mais próximos da realidade, esse exige domínio em ferramentas de simulação e demanda mais tempo e dados de projeto para ser executado. Portanto, foi apresentado o método simplificado, que demanda menos tempo e dados de projeto para ser aplicado.

O método simplificado apresenta resultados próximos aos do método de simulação, mas em comparação ao método prescritivo, demanda até 30% mais tempo para ser executado. O método simplificado supre a lacuna da precisão dos resultados entre os modelos simplificados e de simulação, mas ainda não resolve o problema da extração de dados de projeto, um dos principais pontos de dificuldade para a avaliação de eficiência energética.

No desenvolvimento do projeto da edificação, existem muitas etapas efetuadas de forma manual e com pouco uso da tecnologia da gestão da informação, corroborando com a ocorrência de erros de detalhamento e com a omissão de dados de projeto. A dificuldade em extrair os dados do projeto para avaliar a eficiência energética é originada das ferramentas tradicionais de projeto (e.g. AutoCAD) e das características próprias do processo de projeto tradicional. A associação entre os fatores encadeia em uma série de erros e omissões de dados de projeto, que são propagados até a avaliação de eficiência energética.

Para solucionar o problema apresentado é necessário alterar as ferramentas utilizadas e a forma como os projetos são desenvolvidos. A plataforma BIM foi apresentada como uma tecnologia utilizada para ampliar a gestão colaborativa e a integração das fases de projeto. As ferramentas BIM podem automatizar processos durante a fase de projeto, evitando possíveis erros e falhas por parte do projetista. As ferramentas BIM também realizam cálculos e geram relatórios quantitativos dos materiais e elementos do modelo BIM, o que beneficia a avaliação de eficiência energética.

Foi compreendido que a dificuldade para avaliar a eficiência energética da envoltória das edificações pode ser reduzida a partir do emprego da plataforma BIM. Para tanto, foi necessário observar quais dados os modelos desenvolvidos em BIM possuem e são passíveis de serem extraídos. Foi introduzido o conceito de ND, uma escala que determina o grau de desenvolvimento que os elementos dos modelos devem conter em cada nível da escala. A abordagem do ND na avaliação de eficiência energética é relevante, pois essas escalas servem como requisitos mínimos para a avaliação de projetos desenvolvidos em BIM.

Após a observação da possibilidade de automatizar a extração de dados de modelos BIM, foram observados alguns estudos que trataram da aplicação de BIM no tema da avaliação de eficiência energética. Foi constatado que muitas pesquisas abordaram a extração de dados pela interface das ferramentas de modelagem BIM, majoritariamente do Revit.

Assim, a proposta dessa pesquisa de mestrado é analisar a aplicação da plataforma BIM na avaliação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C. Para tanto, será conduzido um estudo exploratório para verificar os benefícios e as limitações de BIM frente as dificuldades na avaliação de eficiência energética da envoltória.

3 MÉTODO

Essa pesquisa visa a análise do uso da plataforma BIM na avaliação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C. Foram identificados os benefícios e as limitações de BIM dentro do tema e, também, idealizadas diretrizes de modelagem para o desenvolvimento de modelos BIM focados na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória.

O método adotado foi a *Design Science Research* (DSR), que apresenta um conjunto de técnicas para o desenvolvimento de pesquisas focadas na resolução de problemas práticos. O principal atributo da DSR é a construção de artefatos (e.g. constructos; modelos; métodos; instanciações, etc.) que solucionam os problemas de forma satisfatória (LACERDA *et al.*, 2013). Os artefatos precisam atender a um propósito específico, ser testados de forma prática em experimentos e avaliados (DRESCH; LACERDA; ANTUNES, 2014).

O método foi delineado em três fases, são estas: exploração; desenvolvimento; e avaliação. A fase de exploração visou aprofundar o conhecimento do pesquisador no desenvolvimento de modelos BIM a partir de um estudo exploratório. A fase de desenvolvimento focou na idealização das diretrizes de modelagem BIM, específicas para a criação de modelos focados na avaliação simplificada da envoltória. As diretrizes de modelagem BIM foram criadas a partir do estudo exploratório e testadas em um estudo de caso.

Na fase de avaliação foram definidos os critérios para determinar se as diretrizes de modelagem BIM foram satisfatórias dentro do contexto do problema de pesquisa. A Figura 7 demonstra o fluxograma das atividades delineadas do método.

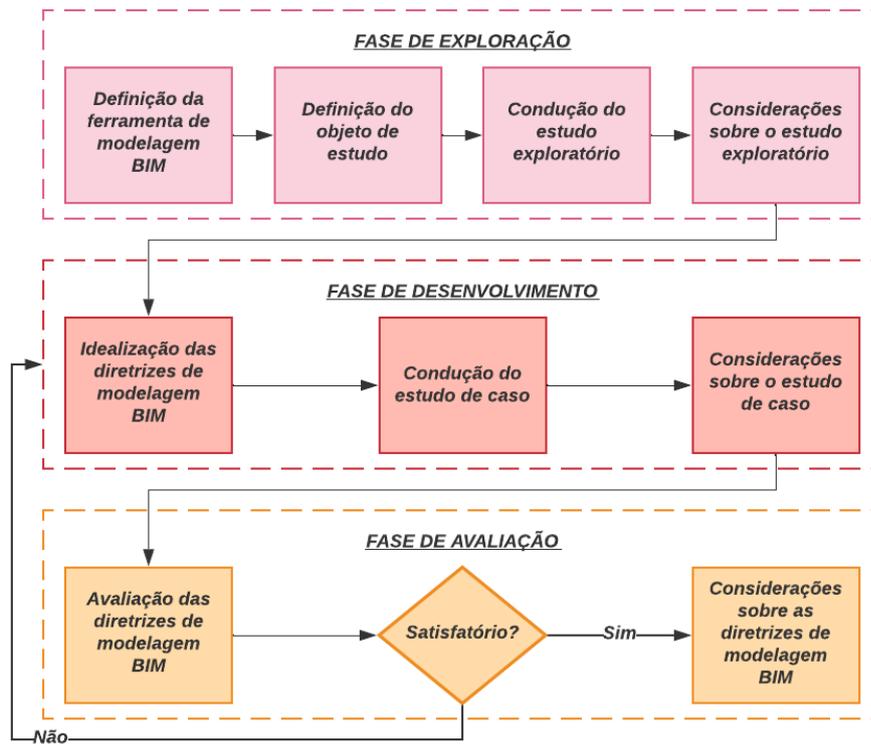


Figura 7 - Delineamento do método de pesquisa
 Fonte: Autor, 2022.

3.1 Fase de exploração

A primeira fase do método de pesquisa visou o aprofundamento do autor no desenvolvimento de modelos BIM. Foi conduzido um estudo exploratório para analisar a aplicação da plataforma BIM na avaliação simplificada da envoltória. Antes do estudo exploratório foi necessário definir a ferramenta de modelagem BIM, o objeto de estudo e o procedimento de modelagem BIM.

3.1.1 Definição da ferramenta de modelagem BIM

Pelo limite de tempo, a análise do uso da plataforma BIM na avaliação simplificada da envoltória foi conduzida apenas com uma ferramenta de modelagem BIM. Considerando as pesquisas que associaram a plataforma BIM com a eficiência energética, foi constatado que o Revit é a ferramenta mais citada na literatura, apenas Sartori e Calmon (2019) utilizaram outra ferramenta de modelagem BIM (*i.e.* ArchiCAD).

A ferramenta mais utilizada pelos profissionais do mercado também foi elencada como critério de definição da ferramenta de modelagem BIM para essa

pesquisa. Segundo a *National Building Specification* (NBS, 2020), as ferramentas de projetos mais utilizadas pelos arquitetos e engenheiros são Revit, ArchiCAD, AutoCAD, AutoCAD LT e Vectorworks. A Figura 8 apresenta a preferência dos profissionais frente às ferramentas supracitadas e demonstra que o Revit é a mais utilizada no mercado da Arquitetura, Engenharia e Construção.

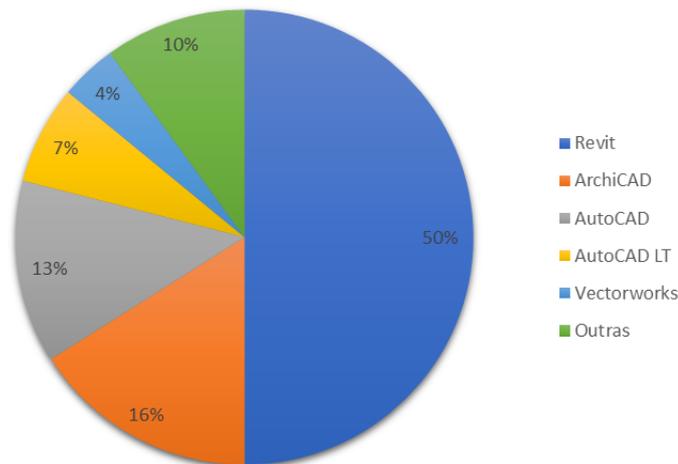


Figura 8 - Ferramentas projetuais mais utilizadas pelos projetistas
Fonte: Adaptado de NBS, 2020.

Tanto no meio acadêmico, quanto no mercado, o Revit é a ferramenta de modelagem BIM mais utilizada. Esse *software* também é a ferramenta de modelagem BIM utilizada no curso de Arquitetura e Urbanismo da UFPel e, portanto, é mais acessível para a condução dessa pesquisa. Em concordância com as referências e visando utilizar uma ferramenta de modelagem BIM aderente às tendências da academia e do mercado, a presente pesquisa adotou o Revit como ferramenta de trabalho.

3.1.2 Definição do objeto de estudo da fase de exploração

Pela fase de exploração ser uma atividade de aprendizagem, foi definido que o objeto de estudo apresente uma geometria simples e apresente os dados para a avaliação de eficiência energética da envoltória.

Os protótipos representativos de Carlo (2008) atendem aos critérios determinados para a definição do objeto de estudo. Os protótipos foram desenvolvidos a partir do levantamento fotográfico de 1.103 amostras de edificações, sendo que o maior número de amostras coletadas pertence à tipologia de escritórios, 357 amostras coletadas. Por esse motivo, o protótipo representativo de grandes escritórios foi

selecionado como objeto para o desenvolvimento do estudo exploratório. A Figura 9 ilustra o protótipo de grandes escritórios e a Tabela 3 apresenta as principais características do objeto.

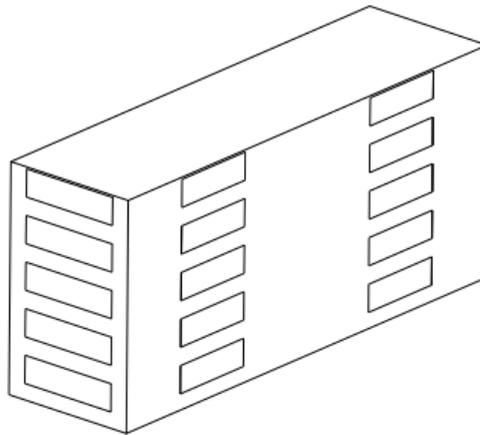


Figura 9 - Protótipo representativo de grandes escritórios
Fonte: CARLO, 2008.

Tabela 3 - Características do protótipo representativo de grandes escritórios

Parâmetro	Valor	Unidade
Número de pavimentos	5	
Largura	7,50	m
Comprimento	27	m
Pé-direito	2,60	m
Percentual de área de abertura na fachada total	25	%
Fator solar	0,83	
Ângulo vertical de sombreamento	0	°
Ângulo horizontal de sombreamento	0	°
Transmitância térmica da parede	2,39	W/m ² .K
Transmitância térmica da cobertura	1,17	W/m ² .K
Absortância solar da parede	0,35	
Absortância solar da cobertura	0,60	
Orientação solar	Norte-Sul	
Ocupação	19,60	m ² /pessoa
Densidade de potência de iluminação	6,70	W/m ²
Densidade de potência de equipamentos	9,60	W/m ²
Horas de ocupação	8	

Fonte: Adaptado de CARLO, 2008.

O valor da transmitância térmica do vidro não foi apresentado por Carlo (2008). Para contornar essa limitação, foi adotado o valor da condição de referência da INI-C para edificações de tipologia de escritórios (*i.e.* 5,70 W/m².K).

Carlo (2008, p.77) afirma que as “[...] paredes são de alvenaria de blocos de concreto de 25 cm e a cobertura é formada por um sanduíche de fibrocimento com poliestireno expandido [...]”. A descrição foi insuficiente para determinar com precisão a capacidade térmica dos sistemas construtivos. Para suprir a lacuna foram utilizados sistemas construtivos do RAC (INMETRO, 2013), com os mesmos materiais citados e com propriedades térmicas dentro dos limites de aplicabilidade do método

simplificado da INI-C. A Figura 10 e Figura 11 apresentam os sistemas de alvenaria e cobertura adotados, respectivamente.

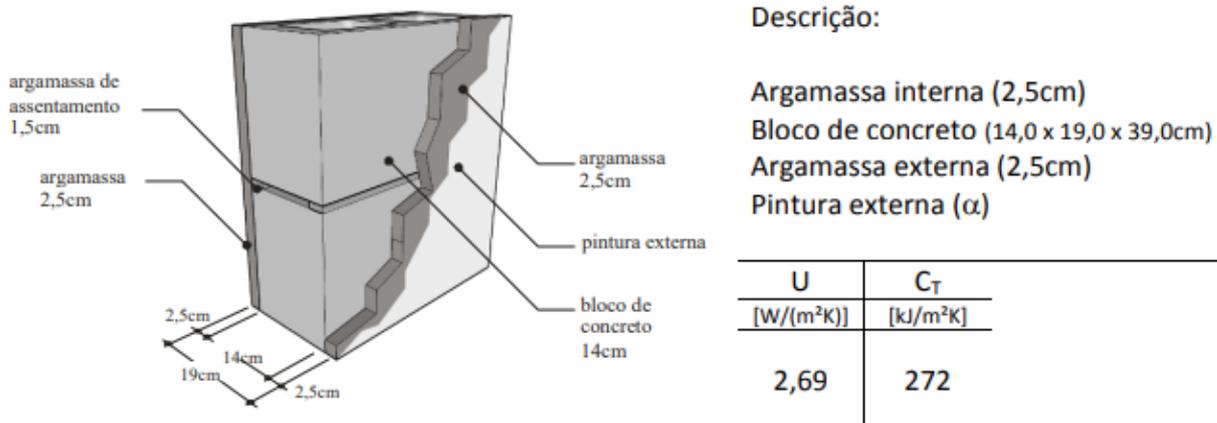


Figura 10 - Sistema de alvenaria adotado para o protótipo representativo de grandes escritórios
 Fonte: INMETRO, 2013.

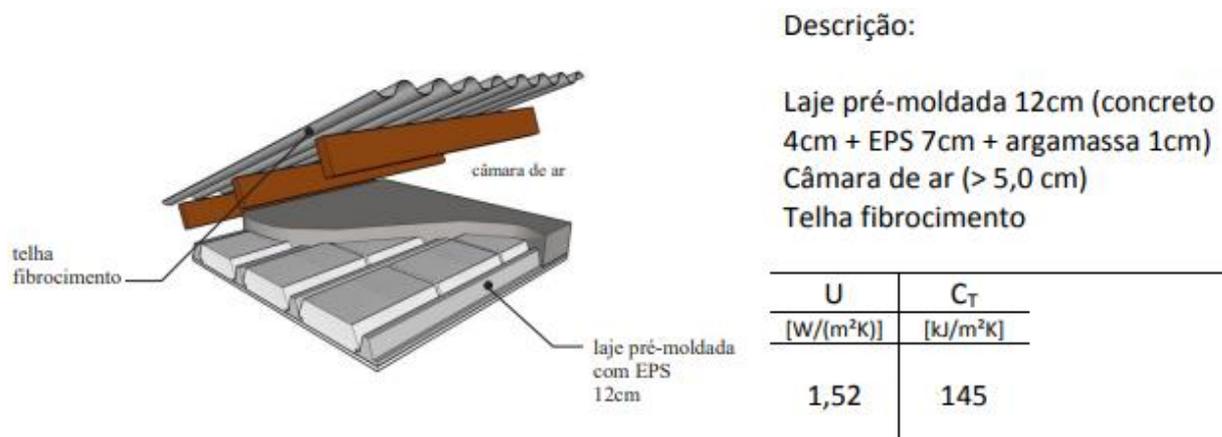


Figura 11 - Sistema de cobertura adotado para o protótipo representativo de grandes escritórios
 Fonte: INMETRO, 2013.

3.1.3 Condução do estudo exploratório

A condução do estudo considerou um procedimento de modelagem BIM – demonstrado ao longo da seção atual – baseado na literatura e nos procedimentos apresentados na disciplina de “Representação Digital em BIM”, lecionada no curso de Arquitetura e Urbanismo da UFPel.

A modelagem do objeto de estudo do estudo foi realizada no template de arquitetura do Revit e a primeira atividade foi a inserção da massa conceitual, uma representação da volumetria do modelo (Figura 12).

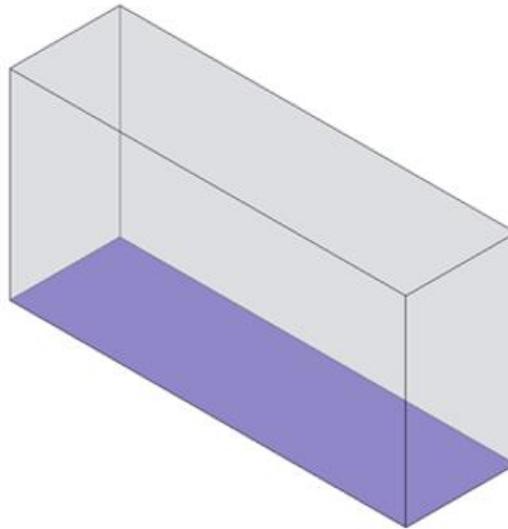


Figura 12 - Massa conceitual do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

Tomando como base a massa conceitual, foram modelados os elementos genéricos, que não possuem camadas de materiais e propriedades físicas e térmicas. Foram utilizadas janelas de correr com duas folhas (1,80 x 1,20m) sem fator solar e transmitância térmica definidas. A Figura 13 apresenta o modelo BIM com elementos genéricos.

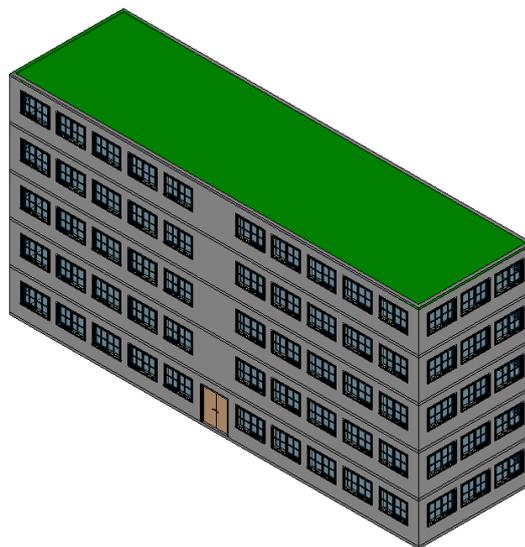


Figura 13 - Modelo BIM do objeto de estudo com elementos genéricos
Fonte: AUTOR, 2022.

A próxima atividade consistiu na criação dos materiais dos elementos e na definição das respectivas propriedades (*i.e.* nome; descrição; nota-chave⁷; aparência;

⁷ A nota-chave é um parâmetro utilizado para descrever um material ou um elemento do modelo BIM.

condutividade térmica; calor específico; e densidade). A Tabela 4 apresenta os materiais criados e as respectivas propriedades.

Tabela 4 - Descrição dos materiais e das respectivas propriedades do objeto de estudo

Material	Elemento	Nota-chave	Densidade [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/m.K]	Calor específico [kJ/kg.K]
Argamassa	Parede	04070 – Reboco de alvenaria	2.400	1,75	1,00
Bloco de concreto	Parede	04220 – Unidades de alvenaria de concreto	2.100	1,40	1,00
Concreto moldado in loco	Piso	03310 – Concreto estrutural	2.400	1,75	1,00
Poliestireno expandido	Piso	07220 – Isolamento de telhado	35	0,040	1,42
Fibrocimento	Telhado	07310 – Telhas	2.200	0,95	0,84

Fonte: AUTOR, 2022.

A partir dos materiais criados, os elementos genéricos foram desenvolvidos para elementos específicos, com camadas e propriedades definidas conforme as especificações apresentadas na seção 3.1.2. Os furos dos tijolos da parede não foram representados no Revit porque a ferramenta trabalha apenas com camadas sólidas, conforme exemplificado pela Figura 14.

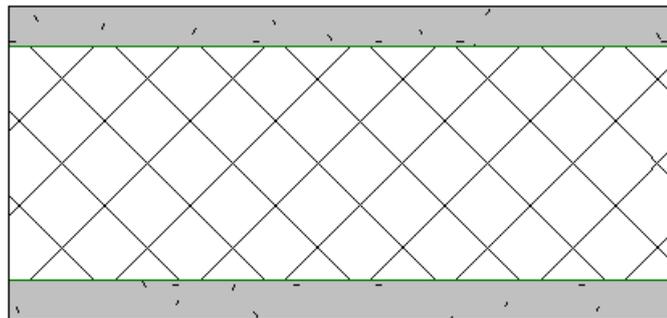
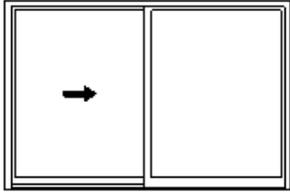


Figura 14 - Representação gráfica da parede do objeto de estudo

Fonte: AUTOR, 2022.

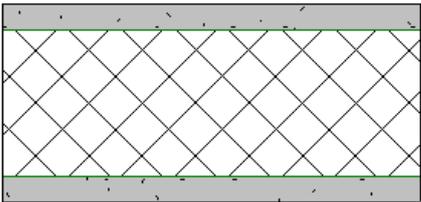
Os valores de fator solar e transmitância térmica das janelas foram inseridos nos parâmetros “Coeficiente de ganho de calor solar” e “Coeficiente de transferência de calor (U)”, respectivamente, conforme a Figura 15.



Propriedades analíticas	
Construção analítica	<Nenhum>
Definir propriedades térmicas por	Definido pelo usuário
Transmissão de luz visual	0,810000
Coeficiente de ganho de calor solar	0,830000
Resistência térmica (R)	0,1754 (m ² ·K)/W
Coeficiente de transferência de calor (U)	5,7000 W/(m ² ·K)

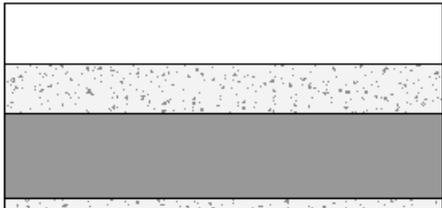
Figura 15 - Inserção das propriedades térmicas das janelas do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2020.

Os valores de absorvância das paredes e da cobertura foram inseridos no parâmetro “Absorvância” dos elementos. O Revit calcula a transmitância térmica das paredes e coberturas, não sendo possível editar o campo “Coeficiente de transferência de calor (U)” desses elementos. A Figura 16 e Figura 17 demonstram o campo utilizado para a inserção da absorvância térmica e o campo bloqueado da transmitância térmica, da parede e da cobertura, respectivamente.



Propriedades analíticas	
Coeficiente de transferência de calor (U)	7,7778 W/(m ² ·K)
Resistência térmica (R)	0,1286 (m ² ·K)/W
Massa térmica	414,000000 kJ/(m ² ·K)
Absorção	0,350000
Rugosidade	3

Figura 16 - Inserção do valor de absorvância da parede do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.



Propriedades analíticas	
Coeficiente de transferência de calor (U)	0,2646 W/(m ² ·K)
Resistência térmica (R)	3,7796 (m ² ·K)/W
Massa térmica	125,387210 kJ/(m ² ·K)
Absorção	0,700000
Rugosidade	3

Figura 17 - Inserção do valor de absorvância da cobertura do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

A Figura 18 apresenta o modelo BIM do protótipo representativo de grandes escritórios com elementos específicos.

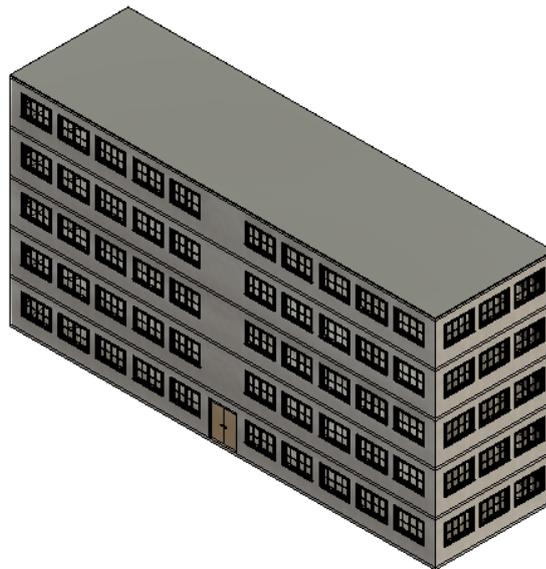


Figura 18 - Modelo BIM do objeto de estudo com elementos específicos
Fonte: AUTOR, 2022.

A próxima atividade foi a divisão das zonas térmicas, que foi feita com o “Separador de espaço” do Revit. O critério utilizado para a divisão foram as diretrizes da INI-C – apresentadas na seção 2.1.1.1 – e a família de espaço do Revit foi adotado para representá-las. A Figura 19 apresenta o objeto de estudo com os separadores de espaço aplicados no modelo BIM.

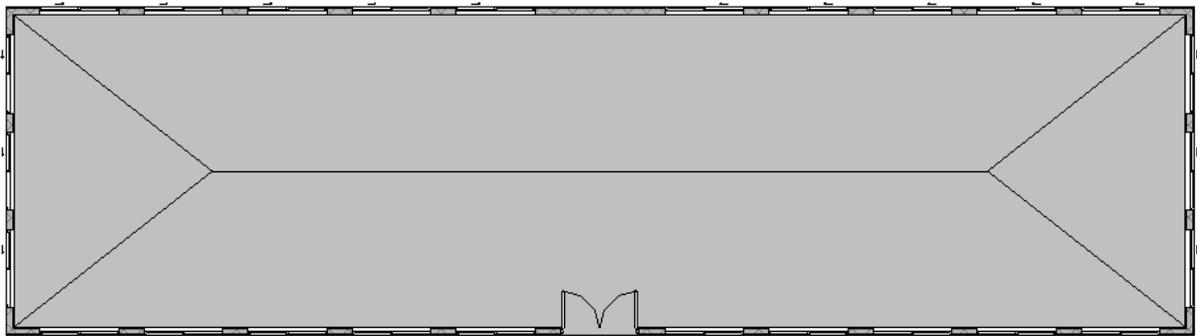


Figura 19 - Divisão das zonas térmicas do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

As zonas térmicas foram inseridas nas divisões a partir da aplicação da família de espaço do Revit e nomeadas com acrônimos para simbolizar o tipo de zona (e.g. ZTP para as zonas térmicas perimetrais) e a orientação solar (e.g. N para zonas térmicas orientadas para o Norte). A Figura 20 demonstra o primeiro pavimento do objeto de estudo com as zonas térmicas divididas.

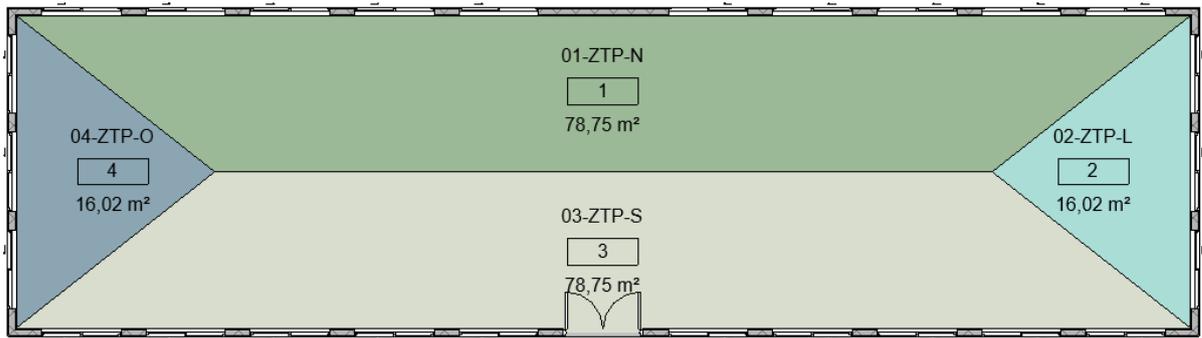


Figura 20 - Inserção das zonas térmicas do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

Os valores de densidade de potência de equipamentos (DPE) e densidade de potência de iluminação (DPI) foram inseridos nas propriedades de cargas elétricas de iluminação e de potência da família de espaço, conforme ilustrado pela Figura 21.

Espaços (1)		Editar tipo
Nome do ambiente	02-ZTP-L	
Imagem		
Comentários		
Fases		
Fase	Construção nova	
Análise de energia		
Zona	Padrão	
Plenum	<input type="checkbox"/>	
Ocupação	<input checked="" type="checkbox"/>	
Tipo de condição	Aquecido e resfriado	
Tipo de espaço	<Construção>	
Tipo de construção	<Construção>	
Pessoas	Editar...	
Cargas elétricas	Editar...	
Informações sobre o ar e...	Do tipo de espaço	
Ar exterior por pessoa	2,36 L/s	
Ar exterior por área	0,30 L/(s·m²)	
Trocadas de ar por hora	0,000000	
Método de ar externo	por Pessoa e por Área	
Carga calculada de aquec...	Não calculado	
Carga de aquecimento d...	0,00 W	
Carga calculada de resfri...	Não calculado	
Carga de resfriamento do...	0,00 W	

Cargas elétricas

Iluminação

Valores: Especificado

Carregar: 107,33 W

Densidade de carga: 6,70 W/m²

Contribuição para o plenum (se existir): 20,00%

Potência

Valores: Especificado

Carregar: 153,79 W

Carregar densidade: 9,60 W/m²

OK Cancelar Ajuda

Figura 21 - Inserção da densidade de potência de iluminação e equipamentos do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

3.1.4 Avaliação e classificação de eficiência energética da envoltória do modelo BIM do objeto de estudo A

A avaliação e classificação da envoltória foi realizada a partir da interface web do metamodelo para edificações condicionadas artificialmente. Os dados das zonas

térmicas foram inseridos na interface do metamodelo⁸, que solicitou 260 dados para a condição real.

O metamodelo calculou o valor da $CgTR_{real}$ e disponibilizou a opção de “Prosseguir com a avaliação”. Foi necessário informar o $CRCgTT_{D-A}$ – parâmetro tabelado pela INI-C – que depende do grupo climático e do FF. Para fins de avaliação, foi considerado que a edificação está situada em Pelotas-RS (*i.e.* grupo climático 5), o FF do modelo é 0,41 e o $CRCgTT_{D-A}$ correspondente foi 0,27 (INMETRO, 2021b, p. 49).

Para o cálculo da $CgTR_{ref}$ não foi necessário preencher os dados para a condição de referência, o próprio metamodelo realizou o procedimento e efetuou a classificação de eficiência energética da envoltória, conforme a Figura 20.

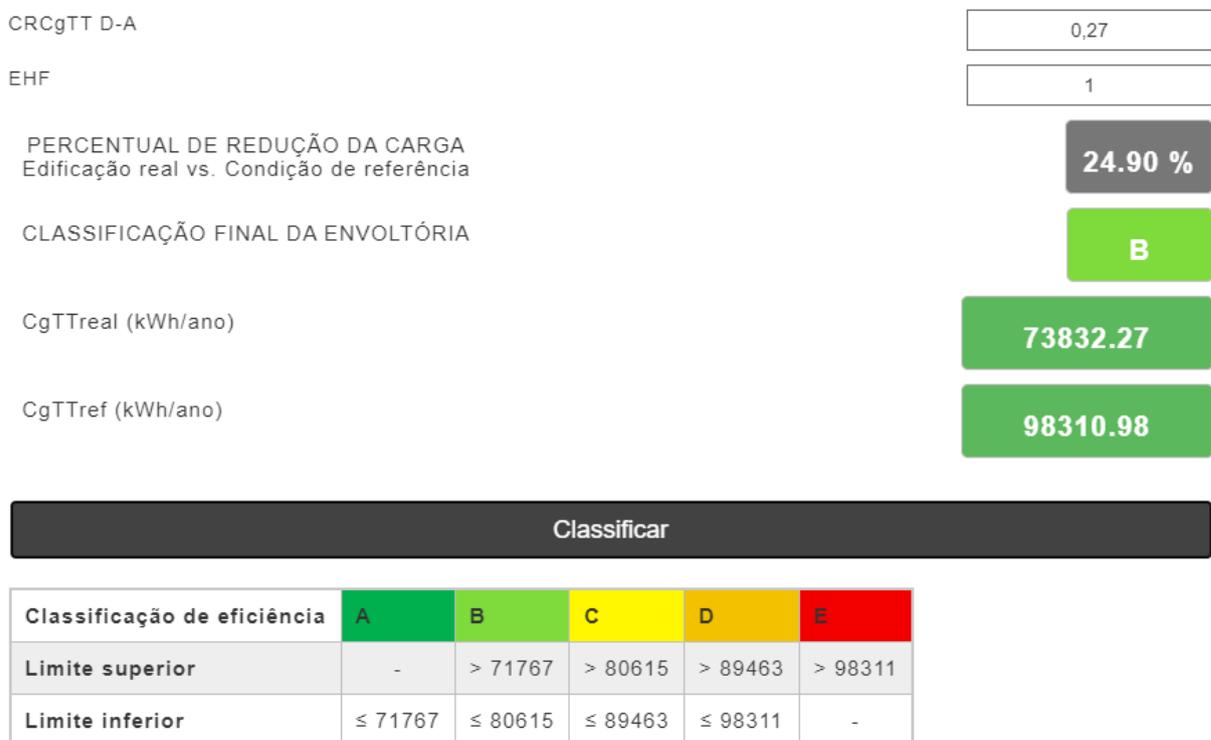


Figura 20 - Classificação de eficiência energética da envoltória do objeto de estudo
Fonte: Adaptado de PBE EDIFICA.

⁸ A interface do metamodelo com os dados preenchidos pode ser consultada neste endereço: <https://drive.google.com/drive/folders/1aw0llyyYkUFy0Jo08rDh0Nc80psFeIVw?usp=sharing>

3.2 Fase de desenvolvimento

A fase de desenvolvimento visou a idealização, a construção e a aplicação do artefato em um estudo de caso. A idealização e construção do artefato foram realizadas com base nas observações do estudo exploratório. O artefato foi aplicado em um estudo de caso para verificar se o problema foi solucionado de forma satisfatória.

3.2.1 Definição do objeto de estudo da fase de desenvolvimento

Após a conclusão da fase de exploração optou-se em utilizar um novo objeto de estudo, com um grau de detalhamento e riqueza de dados maior que o utilizado na fase exploratória. Considerando os requisitos citados, o Anexo FAUrb da UFPel foi definido como objeto de estudo para a fase de desenvolvimento.

A edificação selecionada, apresentada pela Figura 22, é de tipologia educacional de nível superior, abrangida pela Instrução Normativa nº 02/2014. O projeto foi desenvolvido por servidores e discentes da UFPel e o acesso à documentação foi facilitado, fator decisivo para a escolha do objeto de estudo.



Figura 22 - Representação digital do Anexo FAUrb
Fonte: UFPEL⁹.

⁹ <https://wp.ufpel.edu.br/labcee/2020/06/21/ola-mundo/>

A construção do Anexo FAUrb será iniciada em 2022, aos fundos da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo (FAUrb) da UFPel, situada na Rua Benjamin Constant, 1359, Centro, Pelotas-RS. A edificação apresenta proximidade a outros campi, como o Instituto de Ciências Humanas, o Centro de Engenharias e o Campus Anglo, sede administrativa da UFPel e, também, de diversos cursos de graduação e pós-graduação.



Figura 23 - Localização do Anexo FAUrb
Fonte: GOOGLE MAPS, 2021.

O Anexo FAUrb apresenta a orientação nor-nordeste – 17° para o sentido horário – e as características e propriedades construtivas da edificação são apresentadas pelo Quadro 5.

Componente	Descrição	Parâmetro	Valor	Unidade
Parede	Argamassa externa (2 cm) + bloco cerâmico (9 cm) + lâ de rocha (3 cm) + bloco cerâmico (9 cm) + argamassa interna (2 cm)	Transmitância da parede externa	0,80	W/m ² .K
		Absortância da parede	0,30	
		Capacidade térmica da parede externa	184,00	kJ/m ² .K
Cobertura	Telha metálica + câmara de ar (> 5 cm) + lâ de rocha (5 cm) + laje de concreto (10 cm)	Transmitância da cobertura	0,50	W/m ² .K
		Absortância da cobertura	0,20	
		Capacidade térmica da cobertura	256,50	kJ/m ² .K
Vidro	Vidro duplo incolor (3 mm + 4 mm de câmara de ar + 3 mm)	Fator solar do vidro	0,75	
		Transmitância do vidro	3,50	W/m ² .K
Iluminação e ganhos	Média ponderada entre as potências e as áreas dos ambientes	Densidade de potência de iluminação	8,70	W/m ²
		Densidade de potência de equipamentos	9,70	W/m ²

Quadro 5 - Características do Anexo FAUrb
 Fonte: Adaptado de POUÉY *et al.*, 2020.

3.2.2 Idealização das diretrizes de modelagem BIM

A partir dos resultados da fase de exploração, foi formulada a hipótese que um procedimento específico de modelagem BIM pode reduzir as dificuldades existentes na avaliação de eficiência energética da envoltória. Foram idealizadas diretrizes de modelagem BIM focadas na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória. As diretrizes foram divididas em quatro fases, são estas: preparação; modelagem de dados; modelagem geométrica; e centralização de dados. A Figura 24 apresenta a estrutura das diretrizes de modelagem BIM e as atividades apresentadas nas diretrizes são descritas na seção seguinte.

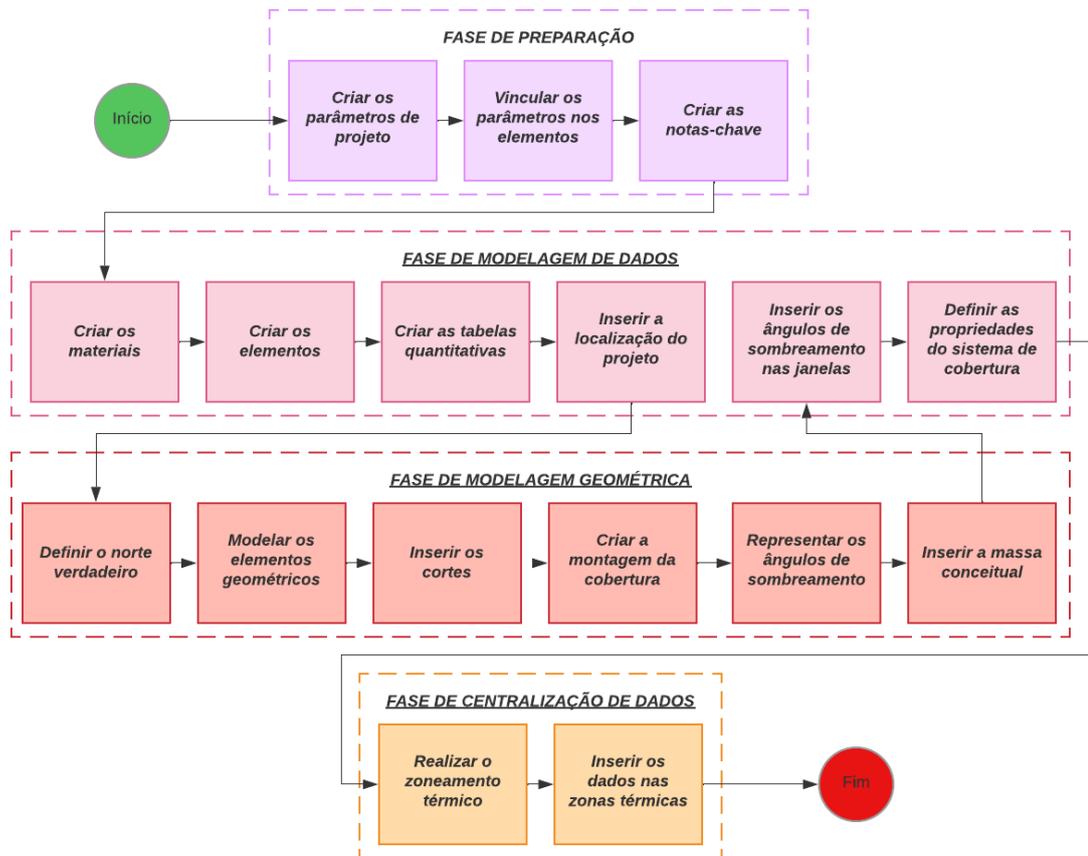


Figura 24 - Diretrizes de modelagem BIM com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória
Fonte: AUTOR, 2022.

3.2.3 Condução do estudo de caso

A primeira etapa das diretrizes de modelagem consistiu na criação dos parâmetros necessários para a aplicação do metamodelo, conforme a Figura 25. Com essa atividade, foi possível inserir todos os dados necessários para a avaliação da envoltória e, também, gerar tabelas pelo Revit com todos esses dados.

Também foram criados parâmetros específicos para os elementos translúcidos (*i.e.* altura do vidro; largura do vidro; área envidraçada; e ângulos de sombreamento); alvenaria externa e sistema de cobertura (*i.e.* absorvância; capacidade térmica; e transmitância térmica); massa conceitual (*i.e.* área da envoltória; e fator de forma); e parâmetros de localização para as paredes e janelas (*i.e.* ambiente; e orientação do elemento).

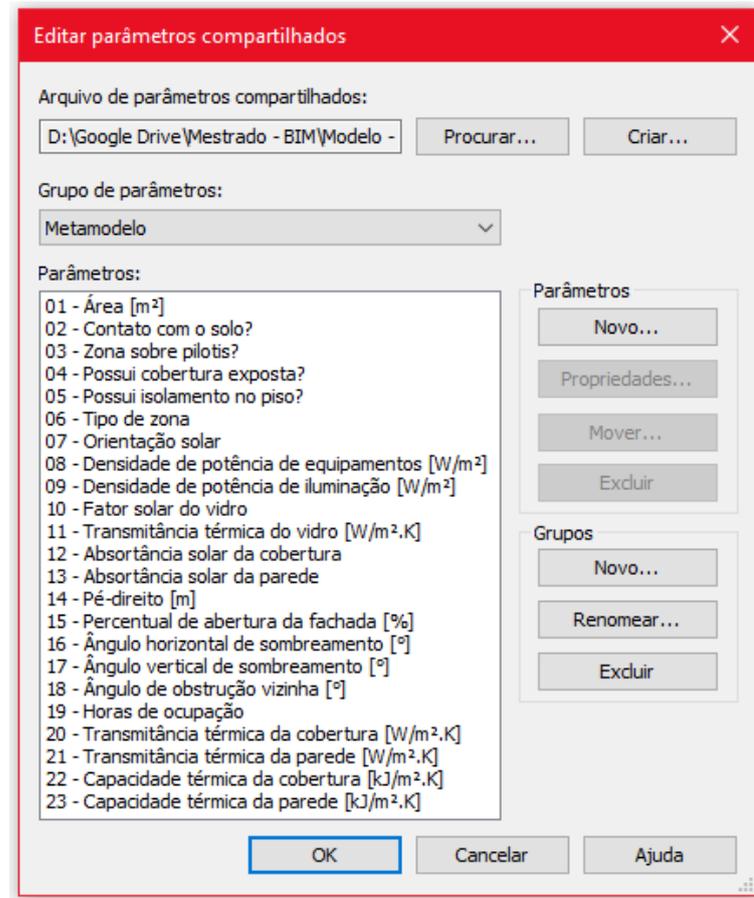


Figura 25 - Parâmetros criados para a inserção dos valores do metamodelo
 Fonte: AUTOR, 2022.

Os parâmetros criados foram vinculados aos seus respectivos elementos a partir dos “Parâmetros do projeto” na aba “Gerenciar”. Exemplificando, a capacidade térmica foi vinculada nas paredes e telhados, caso contrário, não seria possível realizar a inserção dos valores de capacidade térmica nesses elementos. A Figura 26 apresenta os grupos de parâmetros criados e as respectivas famílias de elementos em que foi feita a vinculação.

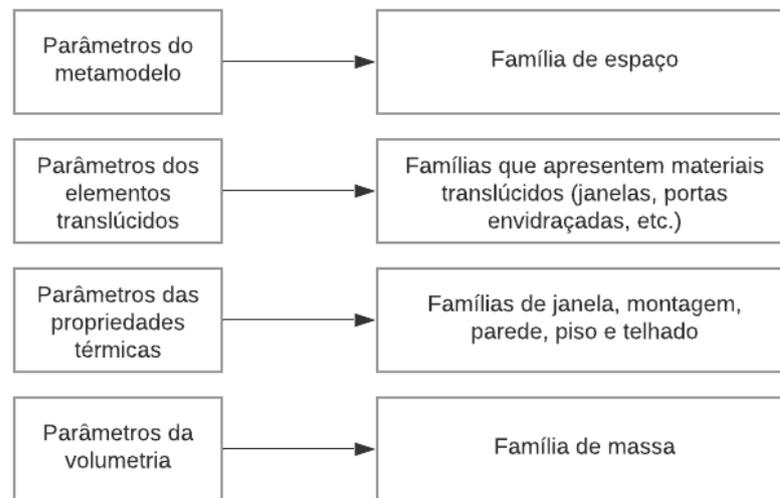


Figura 26 - Representação dos vínculos entre os parâmetros e as famílias de elementos
Fonte: AUTOR, 2022.

A próxima atividade foi a criação das notas-chave, que são códigos para os materiais e elementos construtivos do modelo BIM. As notas-chave serviram para identificar os materiais e elementos, tanto nas tabelas geradas pelo Revit, quanto nos cortes do modelo BIM. O template de arquitetura do Revit apresenta um arquivo de notas-chave padrão que foi usado como modelo para a criação de novas notas-chave. O Quadro 6 apresenta as notas-chave criadas para o Anexo FAUrb.

Identificação	Descrição
03310.B8	Pilar retangular moldado in loco (20 x 40 cm)
03310.C10	Viga retangular para fundação moldada in loco (25 x 45 cm)
03310.C9	Viga retangular moldada in loco (20 x 40 cm)
03310.J5	Laje de concreto moldada in loco (10 cm)
03370.A2	Piso de concreto industrial (2 cm)
03540.A18	Contrapiso interno (3 cm)
03540.A19	Contrapiso externo (5 cm)
03600.A4	Argamassa para assentamento de piso (1 cm)
04210.A11	Tijolo cerâmico de seis furos 9 x 14,5 x 19 cm
07210.A10	Lã de rocha para alvenaria (3 cm)
07210.A11	Lã de rocha para cobertura (5 cm)
07310.D1	Telha metálica (1 mm)
09310.A4	Piso de porcelanato (10 mm)
09650.A4	Piso vinílico (3 mm)

Quadro 6 - Descrição das notas-chave do modelo BIM do Anexo Faurb
Fonte: AUTOR, 2022.

A fase de modelagem de dados visou a criação dos materiais e dos elementos construtivos do Anexo FAUrb. A primeira atividade foi criar os materiais, incluindo os valores das propriedades térmicas (*i.e.* densidade; condutividade térmica; e calor específico). O Quadro 7 apresenta os materiais criados e as respectivas notas-chave e propriedades térmicas.

Material	Nota-chave	Densidade [kg/m³]	Condutividade térmica [W/m.K]	Calor específico [kJ/kg.K]
Concreto para pilar	03310.B8 – Pilar retangular moldado in loco (20 x 40 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto para fundação	03310.C10 – Viga retangular moldada in loco (25 x 55 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto para viga	03310.C9 – Viga retangular moldada in loco (20 x 55 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto para laje	03310.J5 – Laje de concreto moldada in loco (10 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto industrial para piso	03370.A2 – Piso de concreto industrial (1 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto para contrapiso interno	03540.A18 – Contrapiso interno (3 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Concreto para contrapiso externo	03540.A19 – Contrapiso externo (5 cm)	2.400,00	1,750	1,00
Argamassa para assentamento de piso	03600.A4 – Argamassa para assentamento de piso (1 cm)	2.100,00	1,150	1,00
Tijolo cerâmico para alvenaria	04210.A11 – Tijolo cerâmico de seis furos 9 x 14,5 x 19 cm	1.600,00	0,900	0,92
Lã de rocha para alvenaria	07210.A10 – Lã de rocha para alvenaria (3 cm)	200,00	0,045	0,75
Lã de rocha para cobertura	07210.A11 – Lã de rocha para cobertura (5 cm)	200,00	0,045	0,75
Aluzinco para telha metálica	07310.D1 – Telha metálica (1 mm)	2.700,00	230,000	0,88
Porcelanato para piso	09310.A4 – Piso de porcelanato (10 mm)	2.000,00	1,050	0,92
LVT para piso	09650.A4 – Piso vinílico (3 mm)	900,00	0,400	0,10

Quadro 7 - Descrição dos materiais do Anexo FAUrb

Fonte: AUTOR, 2022.

Com os materiais criados no template do projeto, foi realizada a criação dos pisos, paredes e telhado do modelo. O Quadro 8 apresenta os elementos criados e as descrições dos sistemas.

Elemento	Descrição
Alvenaria externa 14 cm (platibanda)	Parade externa composta por duas camadas de argamassa (2,5 cm) e uma camada de bloco cerâmico de seis furos (9 x 14,5 x 19 cm)
Alvenaria externa 25 cm	Parede externa composta por duas camadas de argamassa (2,5 cm), duas camadas de bloco cerâmico de seis furos (9 x 14,5 x 19 cm) e uma camada de lâ de rocha (3 cm)
Alvenaria interna 14 cm	Parade interna composta por duas camadas de argamassa (2,5 cm) e uma camada de bloco cerâmico de seis furos (9 x 14,5 x 19 cm)
Contrapiso externo	Contrapiso para áreas externas (5 cm)
Isolamento térmico da cobertura	Camada de lâ de rocha (5 cm)
Laje	Laje composta por concreto (10 cm)
Pilar 20 x 40 cm	Pilar composto por concreto e recoberto por argamassa
Piso de concreto industrial	Piso de concreto industrial composto por uma camada de contrapiso (3 cm) e uma camada de concreto industrial (2 cm)
Piso de porcelanato	Piso de porcelanato composto por uma camada de contrapiso (3 cm), uma camada de argamassa de assentamento (1 cm) e uma camada de porcelanato (10 mm)
Piso vinílico	Piso vinílico composto por uma camada de contrapiso (3 cm) e uma camada de LVT (3 mm)
Telha metálica	Telha composta por uma camada de aluzinco (1 mm)
Sistema de cobertura	Laje (10 cm) + isolamento térmico (5 cm) + câmara de ar (> 5 cm) + telha metálica (1 mm)
Viga 20 x 55 cm	Viga composta por concreto e recoberto por argamassa
Viga baldrame 25 x 55 cm	Viga para fundação composta por concreto

Quadro 8 - Relação dos elementos criados

Fonte: AUTOR, 2022.

Foi realizada a inserção dos valores de absorvância (*i.e.* 0,30), de capacidade térmica (*i.e.* 184,00 kJ/m².K) e de transmitância térmica (*i.e.* 0,80 W/m².K) no elemento “Alvenaria externa 25 cm”, conforme a Figura 27 - Inserção das propriedades térmicas na parede externa do Anexo FAUrb. Os valores das propriedades térmicas da cobertura foram inseridos após a fase de modelagem geométrica, porque a representação gráfica da cobertura do modelo precisou ser criada para que os valores fossem inseridos.

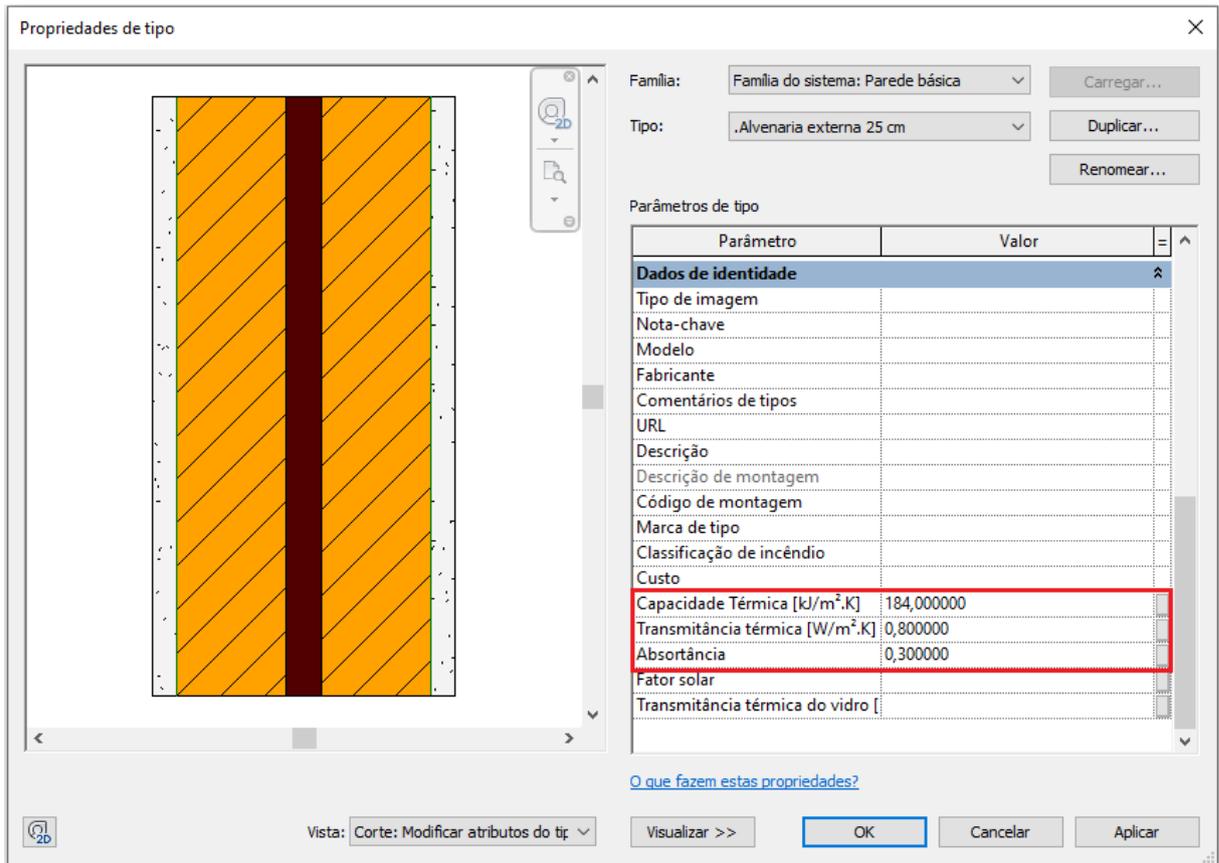


Figura 27 - Inserção das propriedades térmicas na parede externa do Anexo FAUrb
 Fonte: AUTOR, 2022.

Foram adotadas portas de madeira (*i.e.* 0,70 x 2,10 m; e 0,90 x 2,10 m) e janelas maxim ar (*i.e.* 4 folhas de vidro 1,45 x 1,80 m; e 1 folha de vidro 1,20 x 0,70 m). Para as portas, não houve a necessidade de definir nenhuma propriedade específica. Em relação as janelas, foram inseridos os valores de fator solar (*i.e.* 0,75) e de transmitância térmica do vidro (*i.e.* 3,50 W/m².K), conforme apresenta a Figura 28.

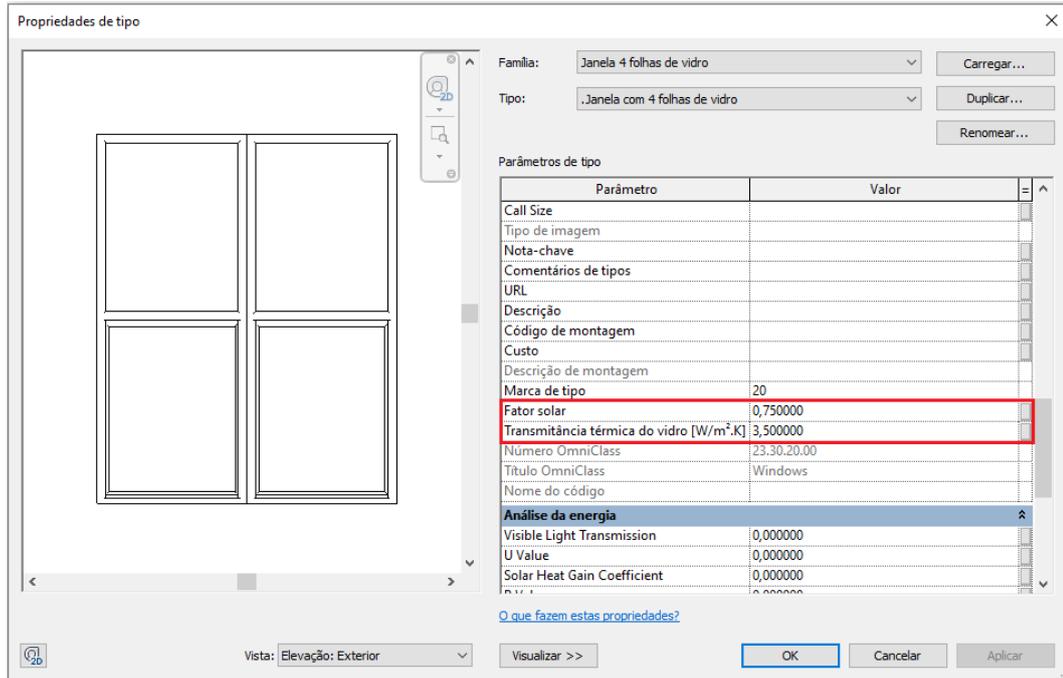


Figura 28 - Inserção das propriedades térmicas nas janelas do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

Na fase de preparação, foram criados parâmetros para os elementos translúcidos. Esses parâmetros foram inseridos nas janelas a partir da interface de edição da família e os parâmetros de altura e largura da folha de vidro foram associados, conforme a Figura 29.

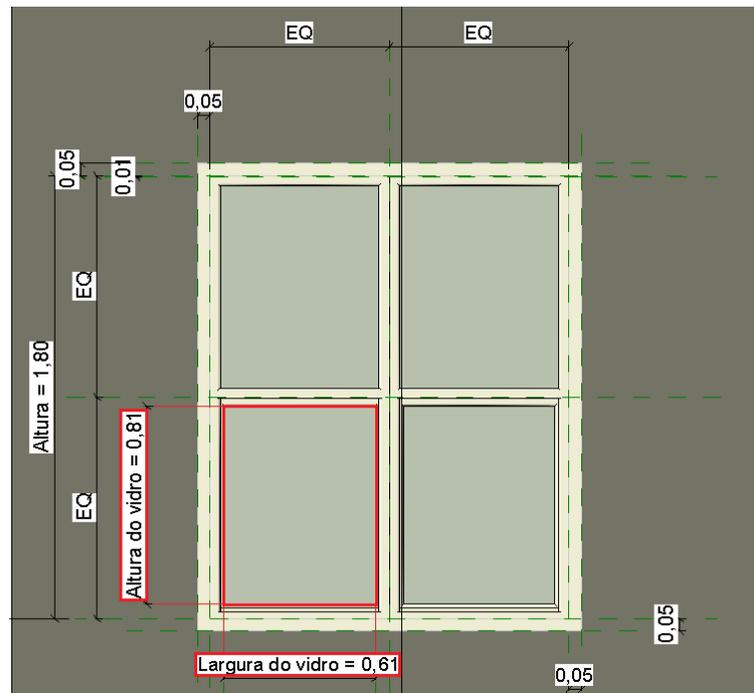


Figura 29 - Parâmetros associados à família de janela do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

A próxima atividade foi a estruturação das tabelas que apresentam todos os parâmetros criados durante a fase de modelagem de dados. Conforme a modelagem geométrica ocorre, os dados dos parâmetros criados são automaticamente incorporados nas tabelas. O Quadro 9 apresenta as tabelas criadas e os parâmetros que cada uma das tabelas possui.

Tabela	Parâmetro associado	Observação
Espaço	Número	Identificação da zona térmica
	Nível	Identificação do pavimento
	Parâmetros do metamodelo	Os 23 parâmetros solicitados pelo metamodelo
Janela	Tipo	Identificação da janela
	Nível	Identificação do pavimento
	Ambiente	Identificação do ambiente
	Orientação do elemento	Identificação da orientação solar da janela
	Área envidraçada	Valor da área envidraçada da janela
	Fator solar	Valor do fator solar do vidro da janela
	Transmitância térmica do vidro	Valor da transmitância térmica do vidro da janela
	Ângulo horizontal de sombreamento	Valor do ângulo horizontal de sombreamento da janela
	Ângulo vertical de sombreamento	Valor do ângulo vertical de sombreamento da janela
Parede	Tipo	Identificação da parede
	Restrição da base	Identificação do pavimento
	Ambiente	Identificação do ambiente
	Orientação	Identificação da orientação solar da parede
	Área	Valor da área da parede
	Absortância	Valor da absortância da parede
	Capacidade térmica	Valor da capacidade térmica da parede
	Transmitância térmica	Valor da transmitância térmica da parede
Montagem/Telhado	Tipo	Identificação da cobertura
	Absortância	Valor da absortância da cobertura
	Capacidade térmica	Valor da capacidade térmica da cobertura
	Transmitância térmica	Valor da transmitância térmica da cobertura
Massa	Tipo	Identificação da massa conceitual
	Área bruta da superfície	Valor da área da superfície da massa
	Área bruta do piso	Valor da área de piso da massa
	Área da envoltória	Valor da subtração entre a "Área bruta da superfície" e a "Área bruta do piso"
	Volume bruto	Valor do volume da massa
	Fator de forma	Valor resultante da razão entre a "Área da envoltória" e o "Volume bruto"

Quadro 9 - Relação das tabelas criadas e dos parâmetros inseridos

Fonte: AUTOR, 2022.

A última atividade da fase de modelagem de dados foi a definição da localização do projeto. Na interface do Revit a localização do projeto da edificação é definida na “Localização e terreno” na Aba “Análise”. A inserção do endereço do projeto, ilustrado pela Figura 30, foi definido conforme as informações da seção 3.2.1.

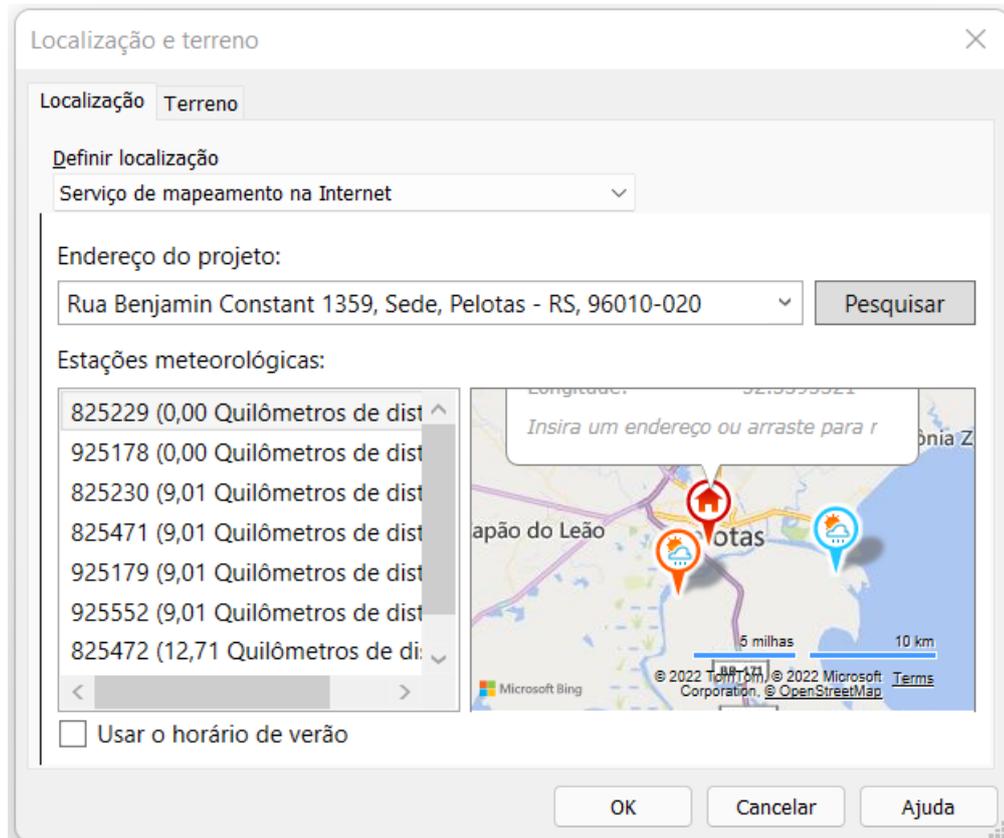


Figura 30 - Inserção do endereço do projeto
Fonte: AUTOR, 2022.

A fase de modelagem geométrica consistiu na inserção dos elementos criados na fase anterior para a representação gráfica do modelo BIM. A primeira atividade foi a definição do norte verdadeiro que precisa ser configurado a partir do comando “Rotacionar o norte verdadeiro” na aba “Gerenciar”. O ângulo de rotação, demonstrado pela Figura 31 foi aplicado a partir da interface gráfica de modelagem do Revit.

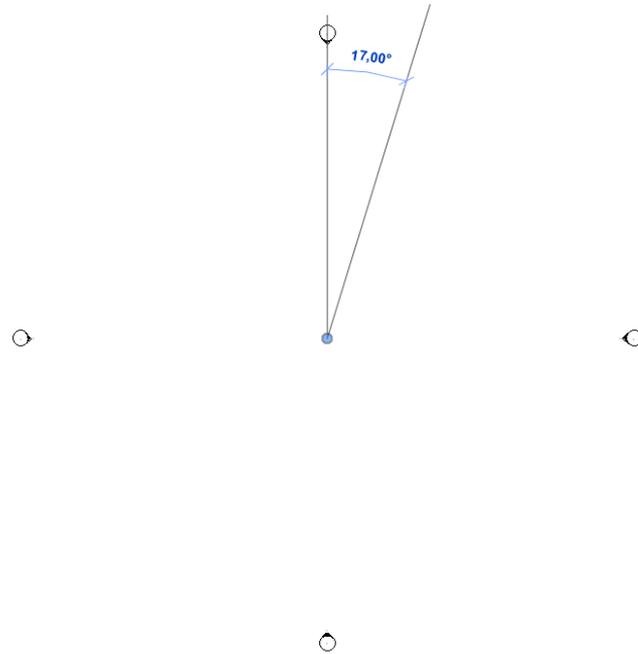


Figura 31 - Rotação do norte verdadeiro
Fonte: AUTOR, 2022.

Os elementos estruturais e as paredes, pisos, telhados, portas, janelas e ambientes internos foram modelados. Da Figura 32 à Figura 37, são demonstradas as representações geométricas do modelo BIM do Anexo FAUrb.

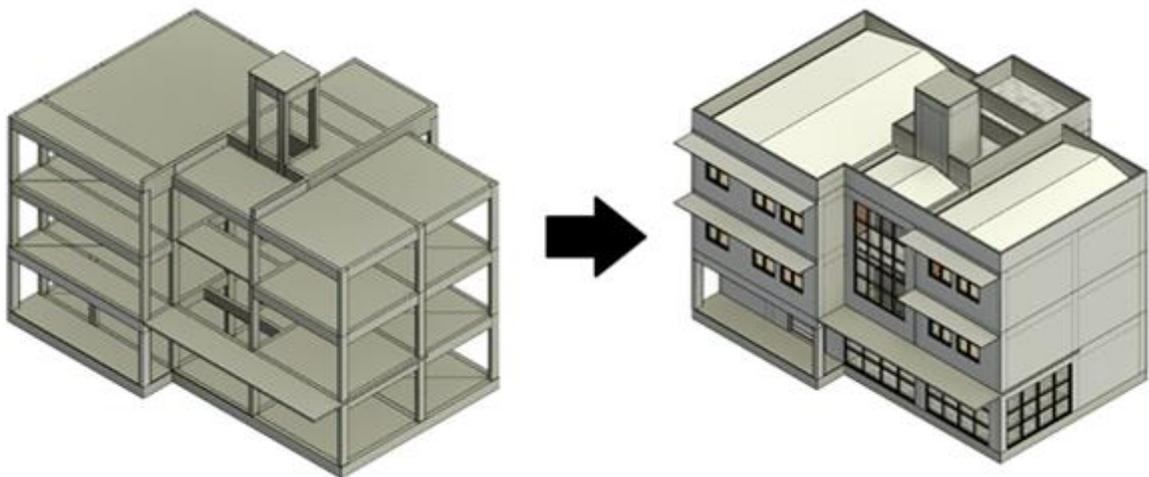


Figura 32 - Vista ortogonal do modelo BIM do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

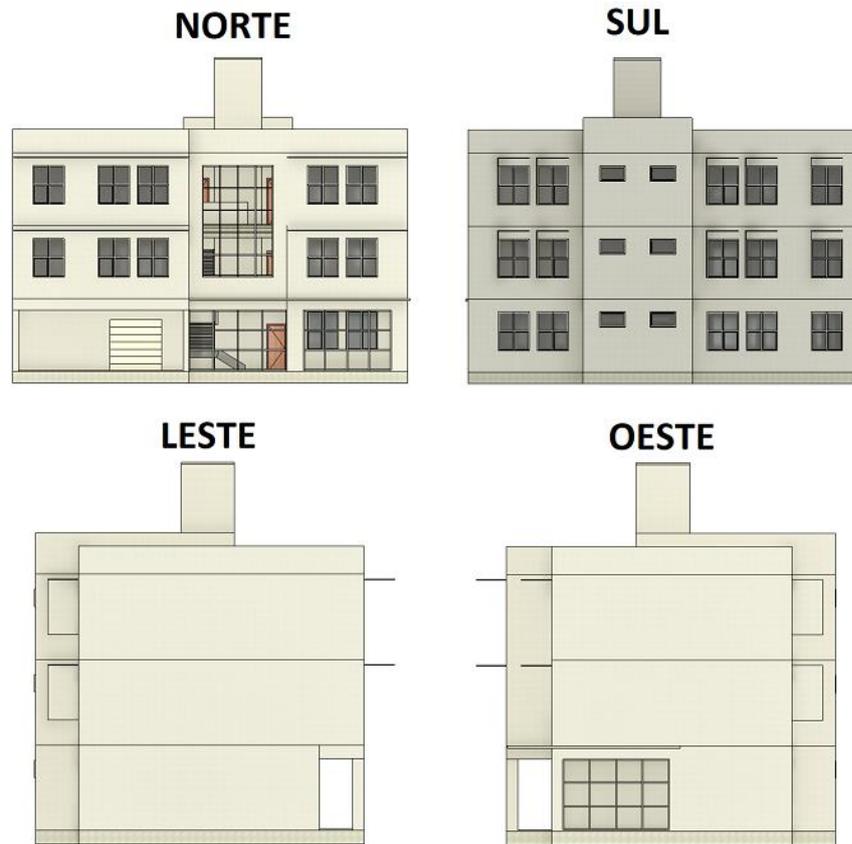


Figura 33 - Fachadas do modelo BIM do Anexo FAUrb
 Fonte: AUTOR, 2022.

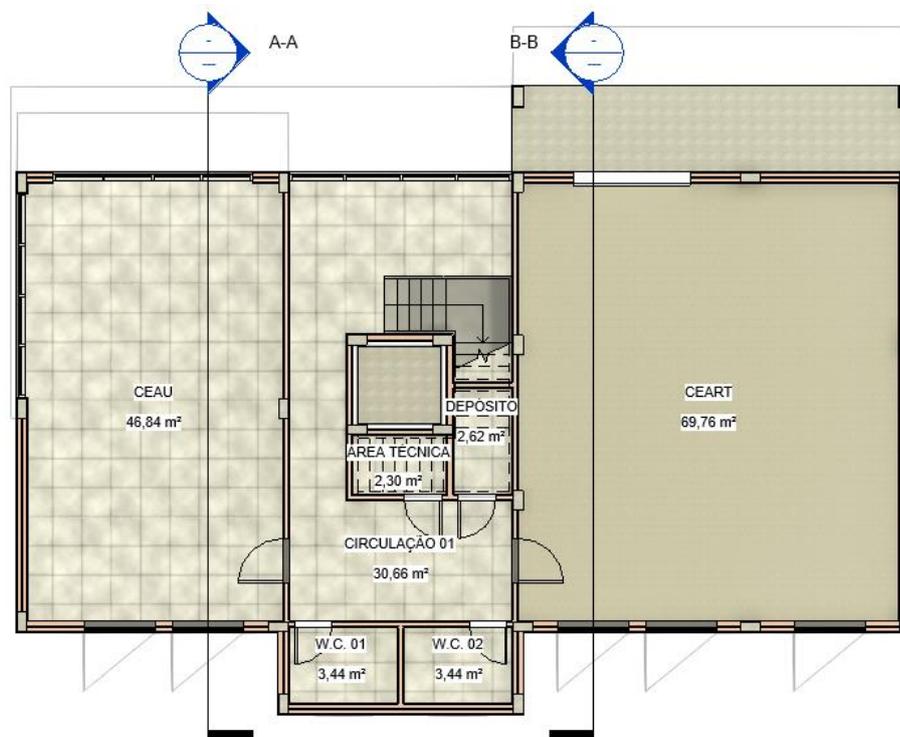


Figura 34 - Planta baixa do térreo do modelo BIM do Anexo FAUrb
 Fonte: AUTOR, 2022.



Figura 35 - Planta baixa do segundo pavimento do modelo BIM do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

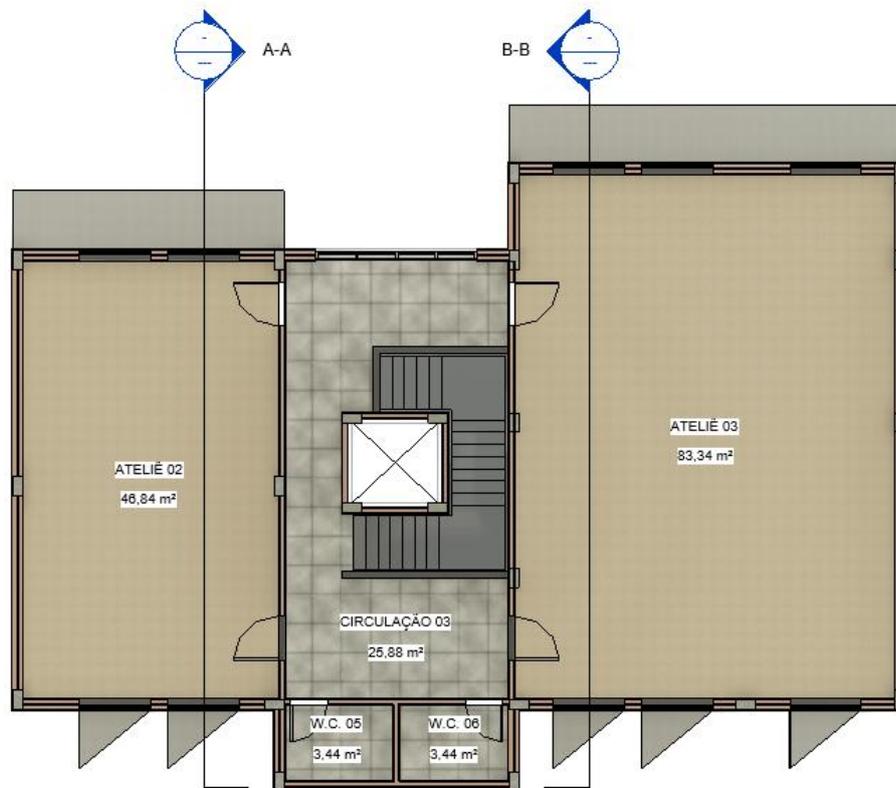


Figura 36 - Planta baixa do terceiro pavimento do modelo BIM do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

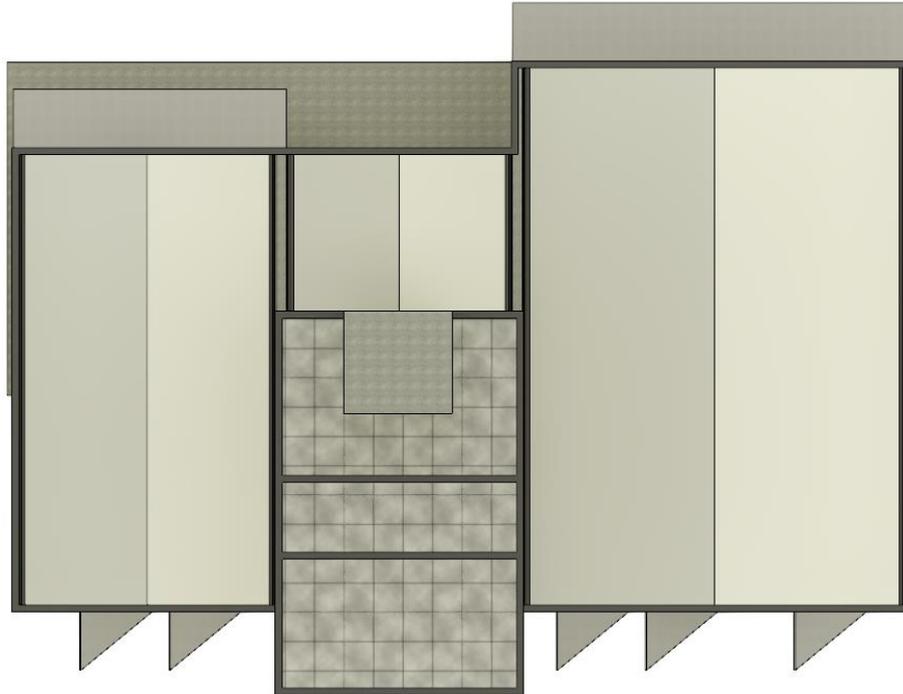


Figura 37 - Planta da cobertura do modelo BIM do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

Assim como no estudo exploratório, os ângulos horizontais e verticais de sombreamento foram representados a partir das plantas e dos cortes inseridos no modelo BIM. A Figura 38, Figura 39 e Figura 40 apresentam os ângulos horizontais e verticais de sombreamento do Anexo FAUrb.

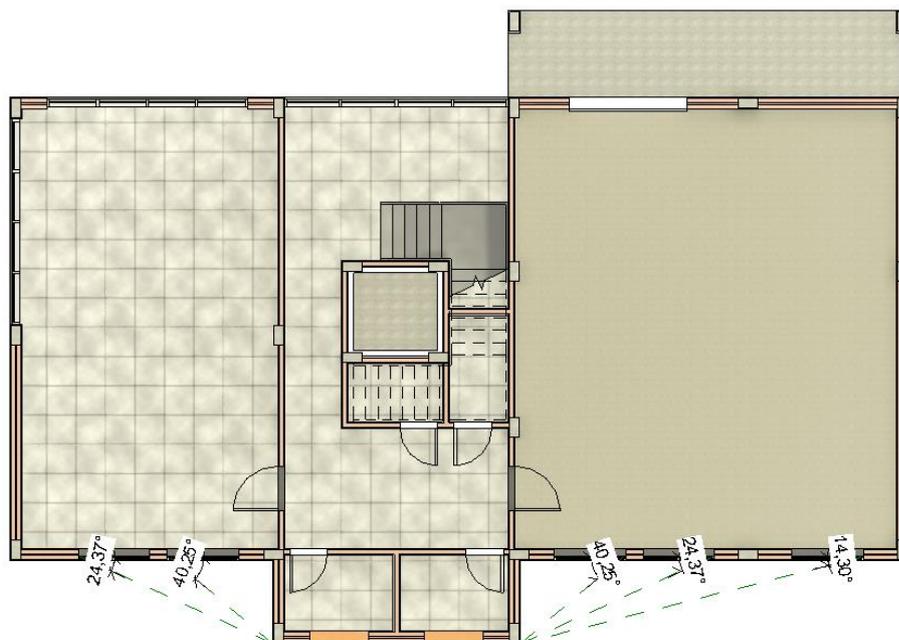


Figura 38 - Representação dos ângulos horizontais de sombreamento do térreo
Fonte: AUTOR, 2022.

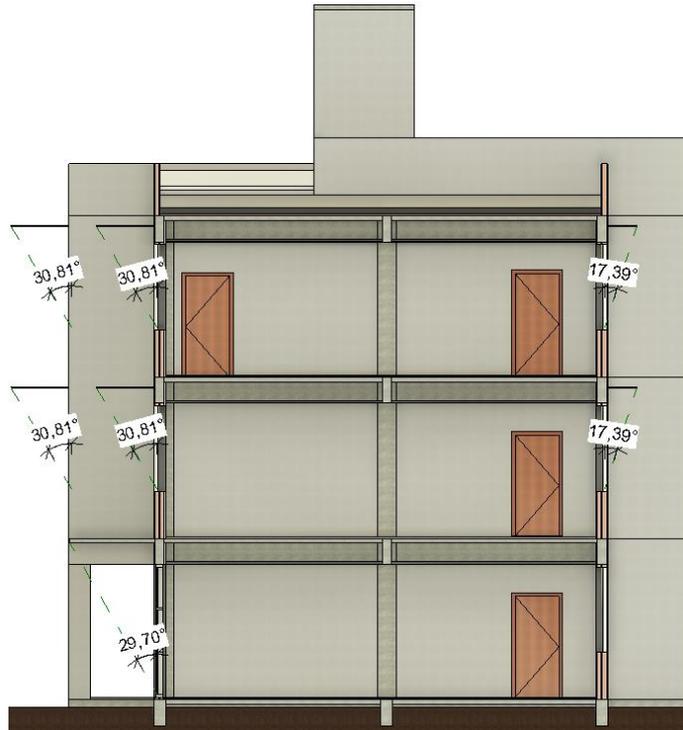


Figura 39 - Representação dos ângulos verticais de sombreamento do corte A-A
Fonte: AUTOR, 2022.

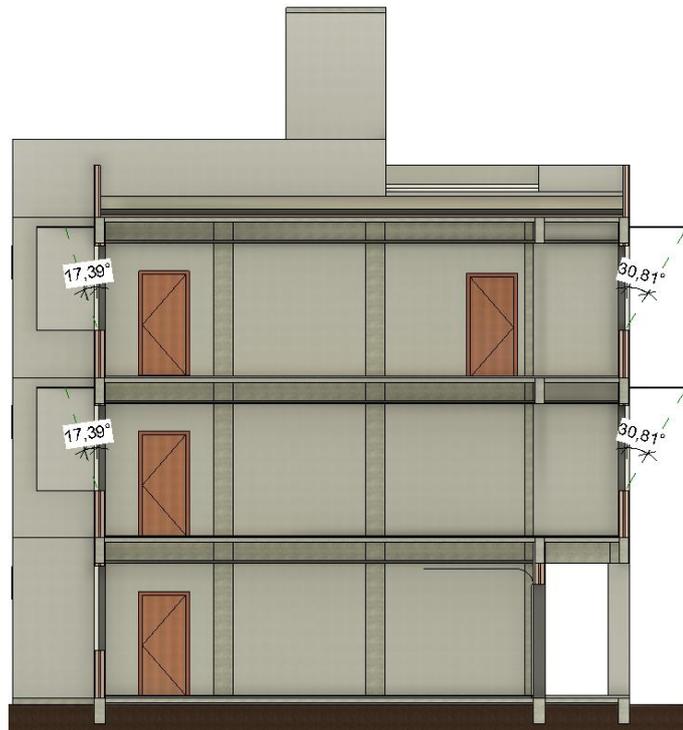


Figura 40 - Representação dos ângulos verticais de sombreamento do corte B-B
Fonte: AUTOR, 2022.

Para a modelagem geométrica da cobertura foi necessário inserir os materiais que compõem a cobertura separadamente, ou seja, não foi feita a modelagem da cobertura a partir de uma única família, como foi feito com a parede. Caso os materiais não sejam incluídos separadamente, a inclinação da telha é aplicada em todos os

materiais. Foi utilizado o artifício da “Montagem”, que permite que elementos modelados separadamente sejam combinados e, dessa forma, o sistema de cobertura que estava representado por três elementos distintos foi unificado em um único elemento, conforme a Figura 41.

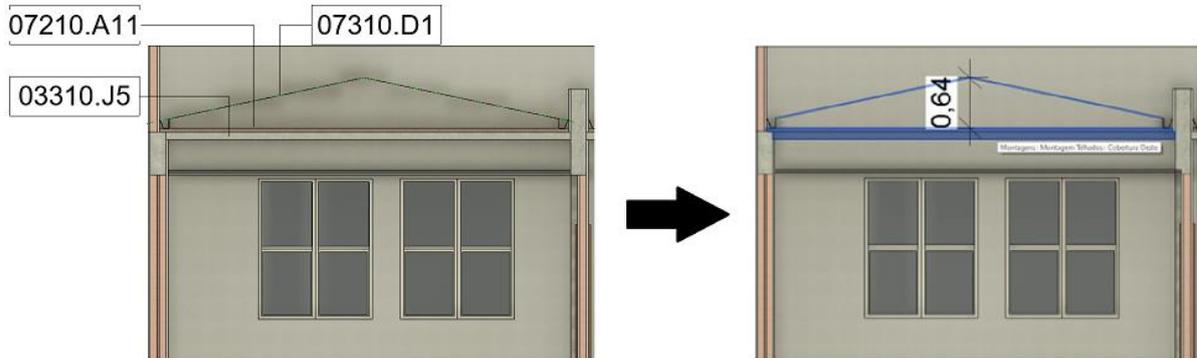


Figura 41 - Representação da montagem da cobertura oeste
Fonte: AUTOR, 2022.

Com a geometria concluída, foi realizada a inserção da massa conceitual (Figura 42), necessária para a obtenção do FF.

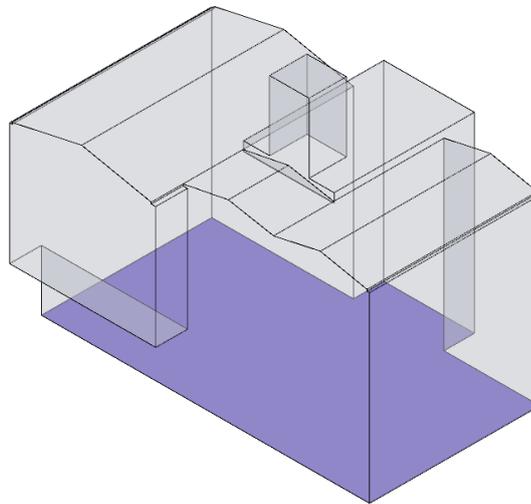


Figura 42 - Massa conceitual do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

Com todos os procedimentos da fase de modelagem geométrica executados, o próximo passo foi inserir as propriedades térmicas no sistema de cobertura; e os valores de ângulos de sombreamento nas janelas. A Figura 43 e Figura 44 apresentam os dados inseridos no sistema de cobertura e nas janelas, respectivamente.

Propriedades de tipo

Família: Família do sistema: Montagem Telhados

Tipo: Cobertura Oeste

Parâmetros de tipo

Parâmetro	Valor
Dados de identidade	
Tipo de imagem	
Nota-chave	
Modelo	
Fabricante	
Comentários de tipos	
URL	
Descrição	
Descrição de montagem	
Código de montagem	
Marca de tipo	
Custo	
Capacidade Térmica [kJ/m ² .K]	256,500000
Transmitância térmica [W/m ² .K]	0,500000
Absortância	0,200000

O que fazem estas propriedades?

<< Visualizar OK Cancelar Aplicar

Figura 43 - Inserção das propriedades térmicas na montagem do sistema de cobertura
Fonte: AUTOR, 2022.

Propriedades

Janela 4 folhas de vidro
Janela com 4 folhas de vidro

Janelas (1) Editar tipo

Restrições

Nível: Nível 2

Altura do peitoril: 1,0000

Gráficos

Frame Option - Flush Fin:

Cotas

Inset to Installation: 0,0349

Dados de identidade

Imagem

Comentários

Marca: 15

Ambiente: ATELIE 01

Orientação do elemento: NORTE

AHS 1: 14,95°

AHS 2: 0,00°

AVS: 30,81°

Fase

Fase criada: Construção nova

Fase demolida: Nenhum

Outros

Altura da extremidade: 2,8000

Figura 44 - Inserção dos ângulos de sombreamento na janela
Fonte: AUTOR, 2022.

A fase de centralização de dados objetivou a divisão das zonas térmicas e a inserção dos valores dos parâmetros nas zonas térmicas. A divisão foi conduzida conforme as diretrizes apresentadas na seção 2.1.1.1, que podem ser resumidas da seguinte forma:

- delimitação das zonas internas e perimetrais;
- diferenciação das orientações das zonas perimetrais;
- divisão de zonas de acordo com a situação de piso, cobertura e pé-direito;
- diferenciação de ambientes de permanência prolongada e transitória;
- diferenciação de zonas condicionadas e ventiladas naturalmente.

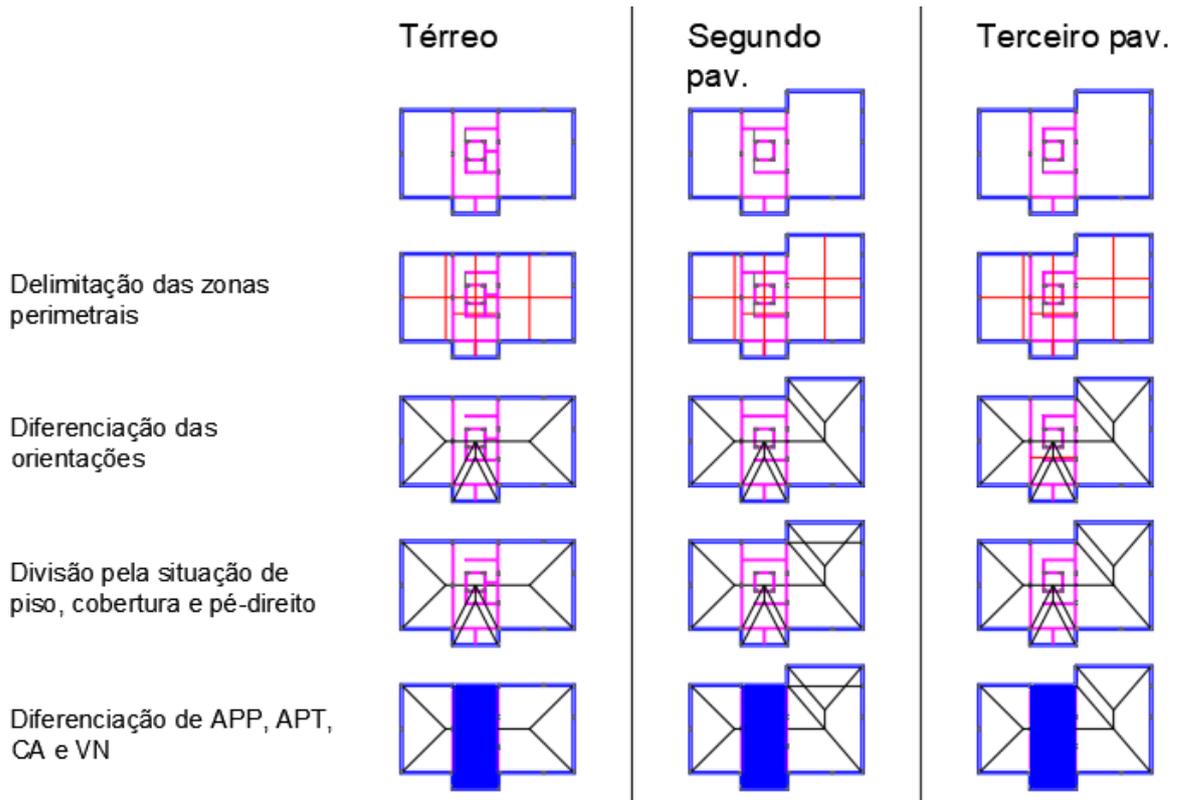


Figura 45 - Passo a passo da divisão das zonas térmicas do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

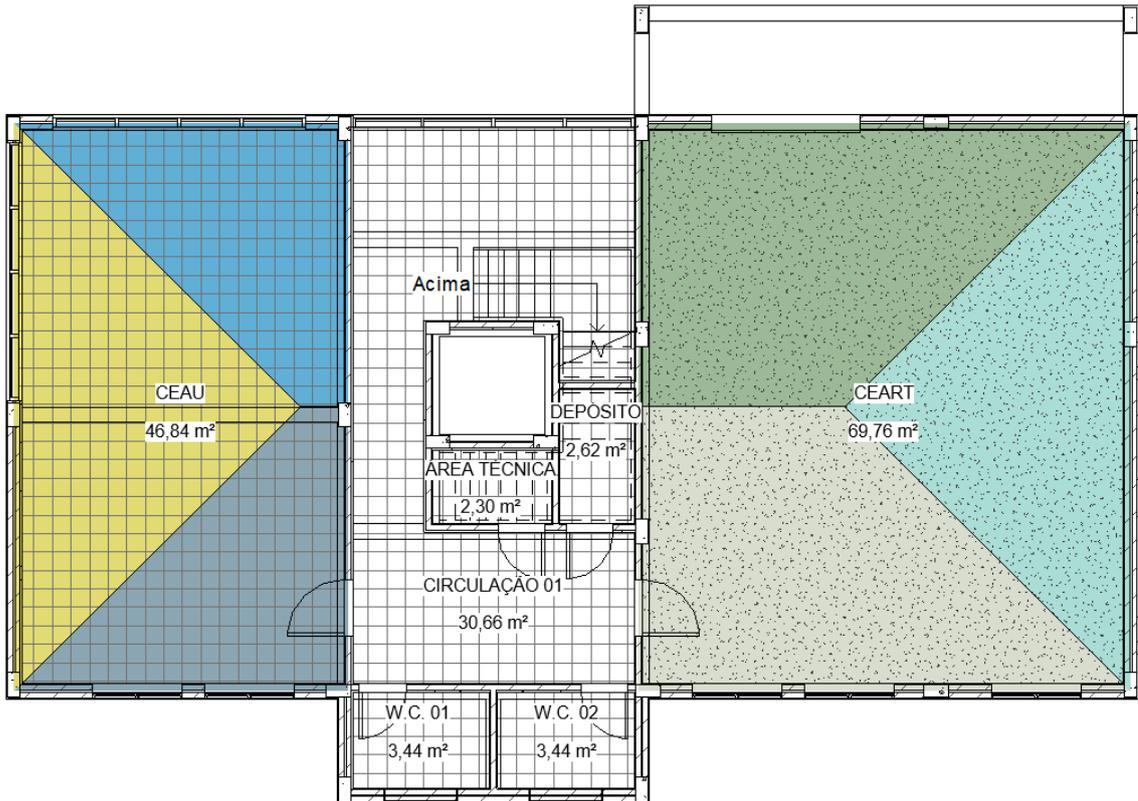


Figura 46 - Divisão das zonas térmicas do térreo do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

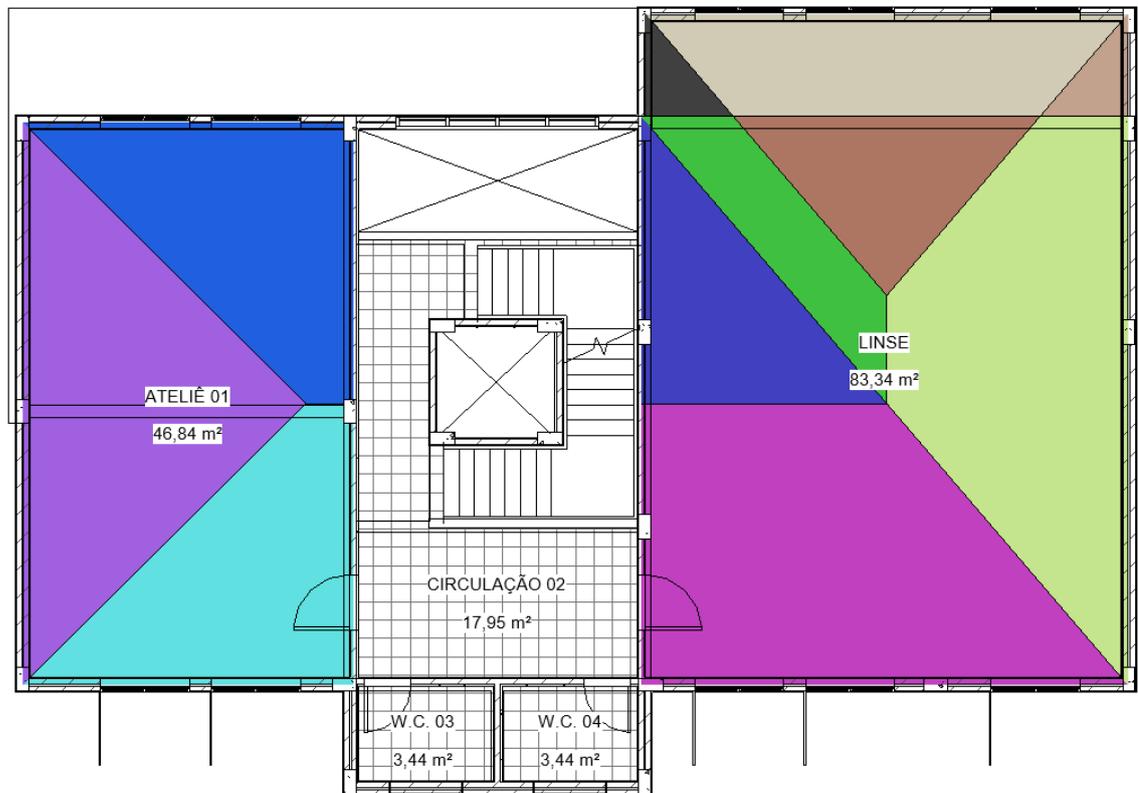


Figura 47 - Divisão das zonas térmicas do segundo pavimento do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

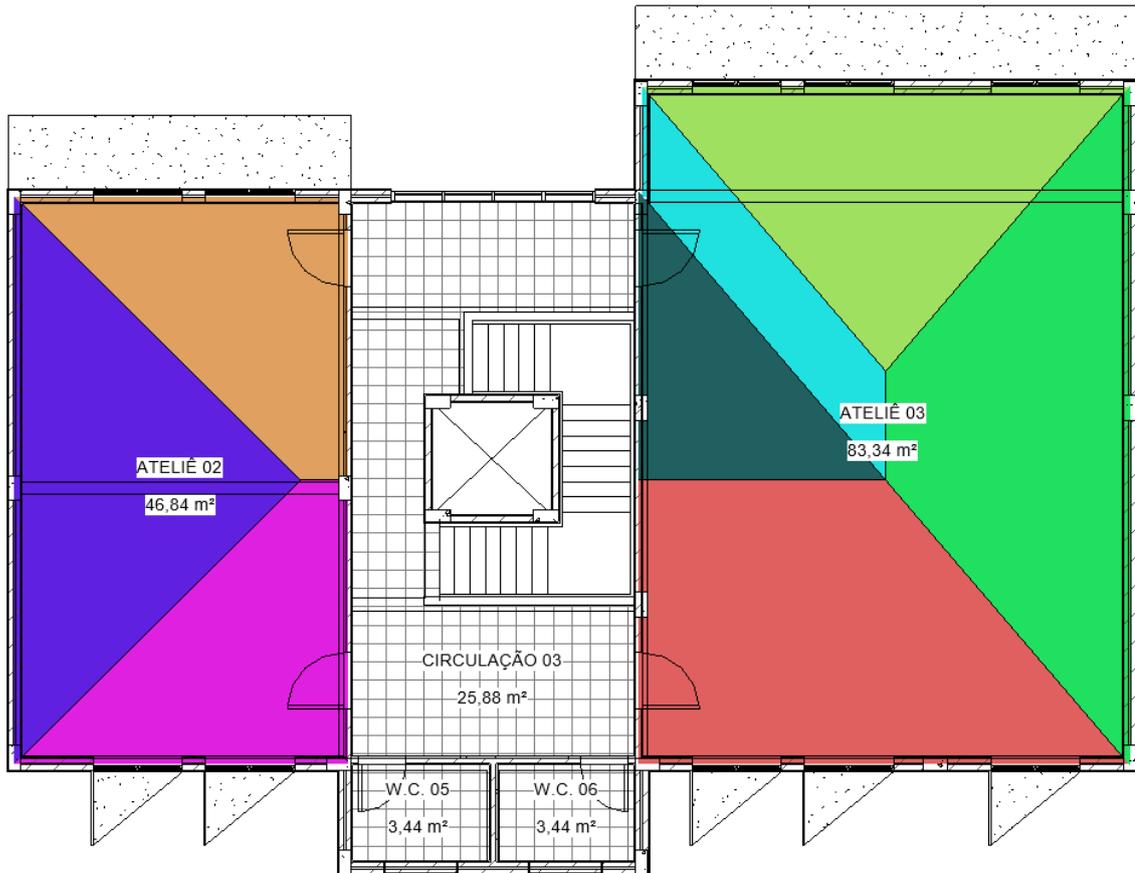


Figura 48 - Divisão das zonas térmicas do terceiro pavimento do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

A última atividade foi a centralização dos dados nas zonas térmicas. Foram preenchidos os 23 parâmetros do metamodelo em todas as zonas térmicas. A Figura 49 apresenta uma das zonas térmicas com os dados necessários para a aplicação do metamodelo.

Dados de identidade	
Número	5
Nome	Espaço
Número do ambiente	1
Nome do ambiente	CEAU
Imagem	
Comentários	
01 - Área [m ²]	20,250000
02 - Contato com o solo?	<input checked="" type="checkbox"/>
03 - Zona sobre pilotis?	<input type="checkbox"/>
04 - Possui cobertura exposta?	<input type="checkbox"/>
05 - Possui isolamento no piso?	<input type="checkbox"/>
06 - Tipo de zona	PERIMETRAL
07 - Orientação solar	OESTE
08 - Densidade de potência de equipamentos [W/m ²]	15,500000
09 - Densidade de potência de iluminação [W/m ²]	15,000000
10 - Fator solar do vidro	0,750000
11 - Transmitância térmica do vidro [W/m ² .K]	3,500000
13 - Absortância solar da parede	0,300000
12 - Absortância solar da cobertura	0,000000
14 - Pé-direito [m]	2,800000
15 - Percentual de abertura da fachada [%]	32,350000
16 - Ângulo horizontal de sombreamento [°]	0,00°
17 - Ângulo vertical de sombreamento [°]	0,00°
18 - Ângulo de obstrução vizinha [°]	0,00°
19 - Horas de ocupação	8
20 - Transmitância térmica da cobertura [W/m ² .K]	0,000000
21 - Transmitância térmica da parede [W/m ² .K]	0,800000
22 - Capacidade térmica da cobertura [kJ/m ² .K]	0,000000
23 - Capacidade térmica da parede [kJ/m ² .K]	184,000000

Figura 49 - Centralização dos dados do metamodelo na zona térmica
 Fonte: AUTOR, 2022.

3.2.4 Avaliação e classificação de eficiência energética da envoltória do modelo BIM do Anexo FAUrb

A avaliação e classificação de eficiência energética do modelo BIM do Anexo FAUrb foi realizada a partir da interface web do metamodelo para edificações condicionadas artificialmente. Os dados das zonas térmicas foram inseridos na interface.

Antes da inserção dos dados, foi necessário informar o estado, cidade, número de pavimentos, tipologia da edificação e, também, o pavimento¹⁰ e o número de zonas térmicas do pavimento. A interface do metamodelo, com os dados da condição real e de referência, pode ser visualizada a partir de endereço¹¹ externo.

¹⁰ A inserção de dados é dividida por pavimentos, ou seja, cada pavimento da edificação apresenta uma aba distinta na interface do metamodelo.

¹¹ https://drive.google.com/drive/folders/13z4S5zm0n14nc8CrF44XRlo2JT8CTD_F?usp=sharing

Além dos dados da tabela de zonas térmicas, a massa permitiu a obtenção do FF (*i.e.* 0,42), que serviu para identificar o CRCgTT_{D-A} (*i.e.* 0,18). A interface do metamodelo realizou automaticamente a classificação da envoltória (Figura 49).

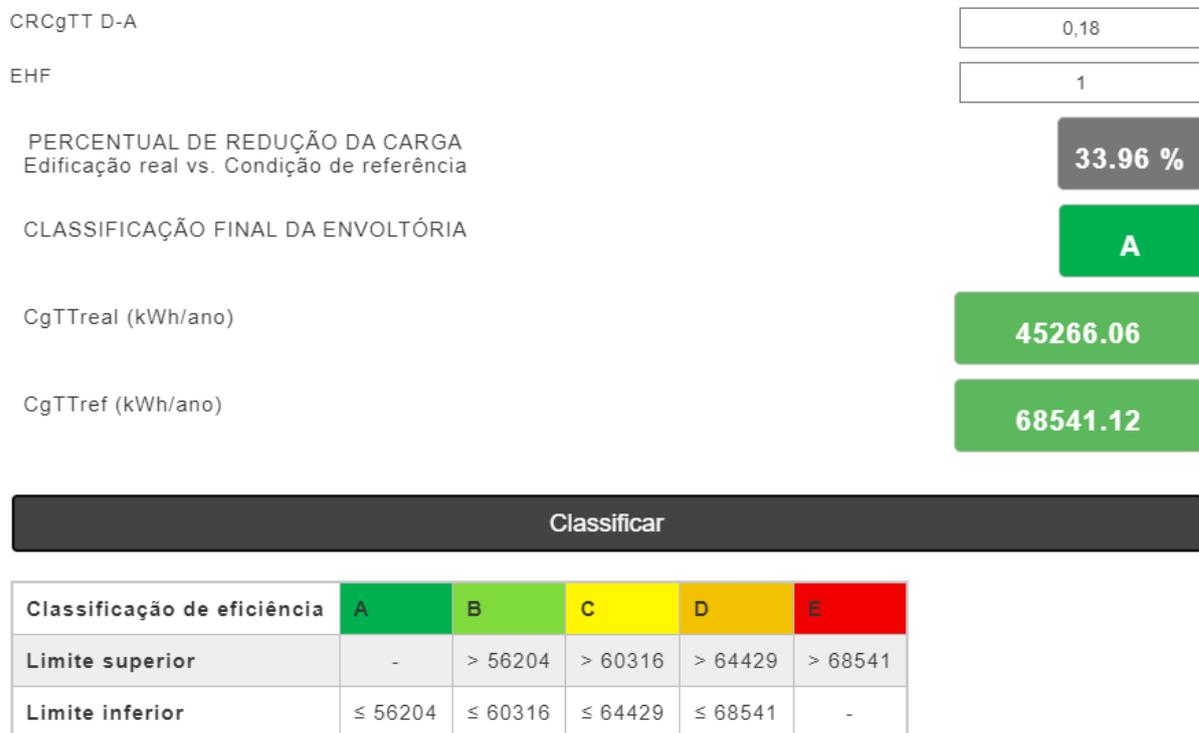


Figura 50 - Classificação de eficiência energética da envoltória do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

3.3 Fase de avaliação

Para avaliar as diretrizes de modelagem BIM, foi definido como critério o impacto que o modelo BIM – resultante das diretrizes de modelagem BIM – apresentou na redução do retrabalho. O segundo critério consistiu na pertinência das diretrizes de modelagem como um guia para o desenvolvimento de modelos BIM destinados ao fim da avaliação simplificada da envoltória, considerando as partes interessadas na etiquetagem do PBE Edifica (*i.e.* projetista e OIA).

Para avaliar o impacto do modelo BIM na avaliação simplificada da envoltória e para avaliar a pertinência do artefato – considerando as esferas do projetista e do OIA – foi proposta uma escala construída com base nas diretrizes do RAC e fundamentada pelo conceito dos descritores de impacto. Segundo Keeney (1992), um descritor é um conjunto de níveis que compõem uma escala linear utilizada como referência para avaliar o nível de impacto de uma alternativa para um problema. A

partir da construção da escala, é possível analisar o contexto e as influências das ações decisórias tomadas dentro de um cenário específico.

A partir da fase de desenvolvimento e de avaliação foi verificado se o artefato solucionou de forma satisfatória o problema de pesquisa e se a hipótese foi validada ou contestada. Com base nas preposições dessas fases, foram expostas as contribuições e as limitações do artefato desenvolvido nesta pesquisa. Também foram realizadas algumas considerações sobre a aplicação de BIM na temática da etiquetagem do PBE Edifica. Por fim, foram apresentadas recomendações para a redução da onerosidade existente no contexto da etiquetagem de eficiência energética no país.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seção 4 as considerações sobre os estudos realizados na pesquisa.

4.1 Considerações sobre o estudo exploratório

Não houve dificuldade para desenvolver o modelo BIM do protótipo representativo de grandes escritórios, principalmente pela geometria simples do modelo. Reitera-se que foi adotado um procedimento de modelagem BIM sem foco na avaliação de eficiência energética e foram utilizados apenas elementos e parâmetros nativos do Revit.

Seguindo o fluxo de procedimentos de modelagem, a primeira atividade foi a inserção da massa conceitual, que forneceu a área bruta da superfície, o volume e a área de piso. A partir desses dados, fornecido pelo Revit, foi possível calcular o fator de forma (FF) do modelo BIM. A Tabela 5 apresenta os valores obtidos a partir da massa conceitual.

Tabela 5 - Valores dos dados necessários para o cálculo do fator de forma do objeto de estudo

Parâmetro	Observação	Valor	Unidade
Área bruta da superfície	Calculado pelo Revit	1.353,75	m ²
Volume bruto	Calculado pelo Revit	2.784,38	m ³
Área bruta do piso	Calculado pelo Revit	202,50	m ²
Área da envoltória	Calculado manualmente a partir da subtração entre a área bruta da superfície e a área bruta do piso	1.151,25	m ²
Fator de forma	Calculado manualmente a partir da divisão entre a área da envoltória e o volume bruto	0,41	m ² /m ³

Fonte: AUTOR, 2022.

Na etapa da inserção dos elementos genéricos, que resultou em um modelo BIM com elementos em LOD 200, foram obtidos os valores das áreas das fachadas e das áreas envidraçadas das janelas, necessários para calcular o percentual de área de abertura na fachada da zona térmica (PAF).

O Revit realizou o cálculo das áreas envidraçadas a partir da somatória de todas as faces do painel de vidro da janela – inclusive da face do ambiente interno – mas na avaliação de eficiência energética da envoltória deve ser considerada apenas a face externa do vidro da janela para o cálculo do PAF. Portanto, os valores calculados pelo Revit não foram utilizados para calcular o PAF, foi preciso calcular manualmente o valor da área envidraçada das janelas, conforme as dimensões

apresentadas na Figura 51. Portanto, o valor da área de vidro calculado manualmente foi 1,66 m².

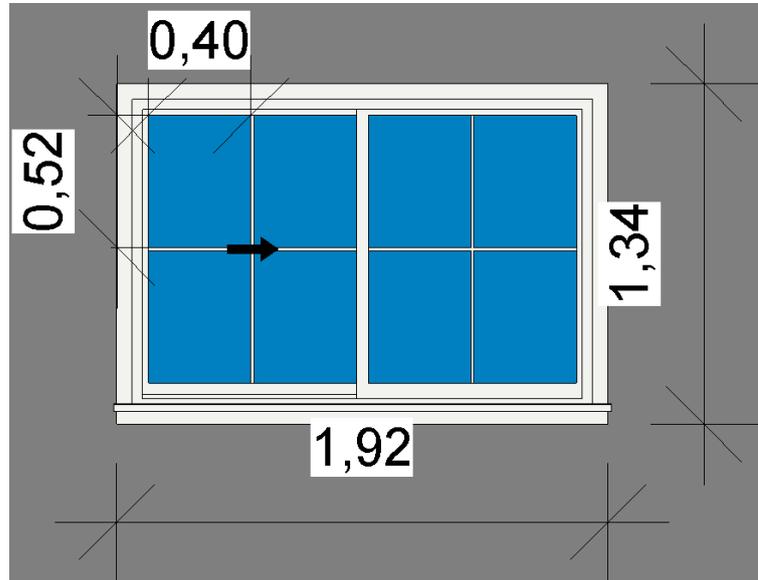


Figura 51 - Dimensões da folha de vidro e da janela do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

A Figura 52 apresenta a tabela quantitativa dos materiais das janelas. Conforme os dados apresentados, foi possível extrair os valores de FS, transmitância térmica e áreas dos materiais que compõem as janelas. Ficou claro que o valor da área de vidro das janelas apresentadas pelo Revit não correspondeu ao valor calculado manualmente.

<Levantamento do material da janela>						
A	B	C	D	E	F	G
Contagem	Tipo	Nível	Coefficiente	Coefficiente de tr	Material: No	Material: Área
26	1800 x 900mm	Nível 1	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Madeira – Ma	3,52 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 1	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Revestimento	1,08 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 1	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Vidro	6,96 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 2	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Madeira – Ma	3,52 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 2	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Revestimento	1,08 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 2	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Vidro	6,96 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 3	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Madeira – Ma	3,52 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 3	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Revestimento	1,08 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 3	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Vidro	6,96 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 4	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Madeira – Ma	3,52 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 4	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Revestimento	1,08 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 4	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Vidro	6,96 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 5	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Madeira – Ma	3,52 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 5	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Revestimento	1,08 m ²
26	1800 x 900mm	Nível 5	0,83	5,7000 W/(m ² .K)	Vidro	6,96 m ²

Figura 52 - Valores dos parâmetros das janelas do objeto de estudo calculados pelo Revit
Fonte: AUTOR, 2022.

Os valores das áreas das paredes das fachadas calculados pelo Revit desconsideraram os valores das áreas das portas e das janelas. Entretanto, a área da parede da fachada para o cálculo do PAF considerou a área total da fachada, incluindo as portas e janelas. Foi necessário excluir as portas e janelas do modelo BIM, criar uma tabela de parede para exportar os valores das áreas das fachadas e desfazer a exclusão dos elementos a partir do comando “desfazer”.

A Figura 53 apresenta os valores das áreas das fachadas antes da exclusão das portas e das janelas e depois da exclusão, demonstrando que o Revit foi capaz de proporcionar os dados da forma necessária para a avaliação de eficiência energética da envoltória.

COM PORTA E JANELAS			SEM PORTA E JANELAS		
<Tabela de parede>			<Tabela de parede>		
A	B	C	A	B	C
Tipo	Restrição da base	Área	Tipo	Restrição da base	Área
.Parede externa 19cm	Nível 1	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 1	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 1	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 1	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 1	44,64 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 1	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 1	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 1	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 2	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 2	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 2	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 2	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 2	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 2	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 2	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 2	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 3	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 3	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 3	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 3	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 3	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 3	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 3	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 3	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 4	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 4	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 4	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 4	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 4	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 4	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 4	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 4	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 5	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 5	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 5	13,02 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 5	19,50 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 5	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 5	70,20 m ²
.Parede externa 19cm	Nível 5	48,60 m ²	.Parede externa 19cm	Nível 5	70,20 m ²

Figura 53 - Valores de área das fachadas do objeto de estudo calculados pelo Revit
Fonte: AUTOR, 2022.

Apenas após as intervenções manuais para obter as áreas envidraçadas e as áreas das fachadas foi possível calcular o PAF. Assim como observado no caso do FF, o PAF foi obtido do Revit, mas houve a necessidade de calcular manualmente os valores. A Tabela 6 apresenta os valores de PAF de cada uma das orientações do objeto de estudo.

Tabela 6 - PAF por orientação do objeto de estudo

Orientação	Área da fachada [m ²]	Área por calculada manualmente [m ²]	envidraçada janela	Número de janelas na fachada	Área envidraçada [m ²]	Percentual de abertura na fachada da zona térmica [%]
Norte	70,20	1,66		10	16,64	23,70
Sul	70,20	1,66		10	16,64	23,70
Leste	19,50	1,66		3	4,99	25,59
Oeste	19,50	1,66		3	4,99	25,59

Fonte: AUTOR, 2022.

A modelagem convencional das paredes no Revit não permitiu a criação de tijolos furados, sendo necessário modelar os elementos em camadas de materiais homogêneos, conforme exemplificado pelo corte transversal da parede na Figura 54. Esse fator prejudicou a avaliação de eficiência energética, porque a representação gráfica das camadas das paredes precisa ser fidedigna para o cálculo da capacidade e da transmitância térmica. Para minimizar esse problema, foram inseridas descrições textuais dos sistemas construtivos.

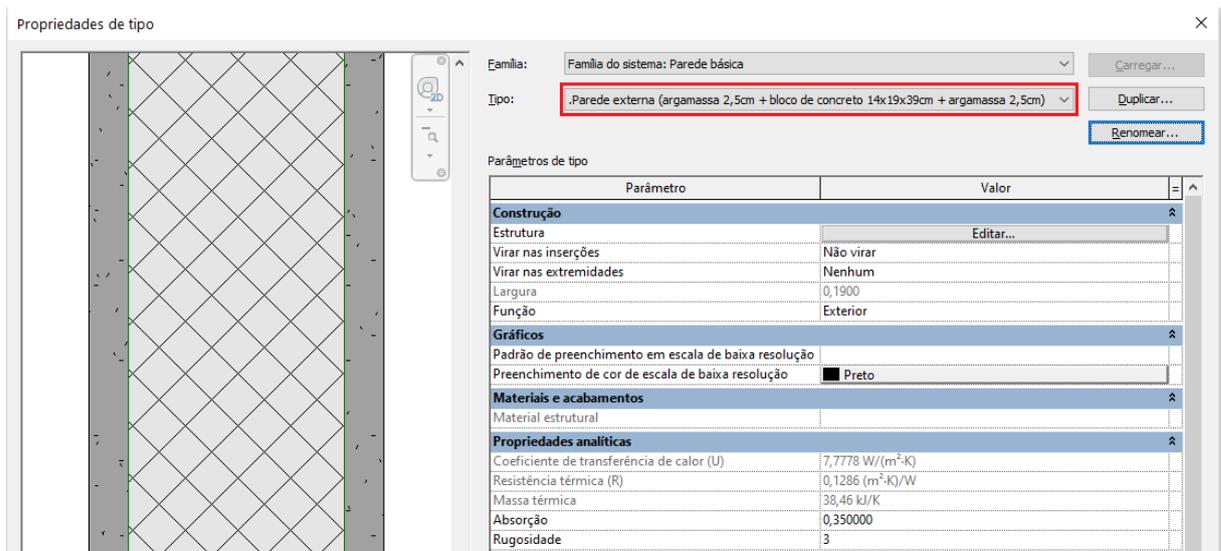


Figura 54 - Aba de propriedades da parede externa do objeto de estudo

Fonte: AUTOR, 2022.

O Revit não foi capaz de mensurar automaticamente os ângulos de sombreamento e, também, não apresentou campos específicos para a inserção dos valores. Portanto, os valores precisaram ser mensurados manualmente a partir de planos de referência, para a inserção de cotas angulares. A Figura 55 e a Figura 56 demonstram respectivamente os ângulos horizontais e verticais de uma janela do objeto de estudo, respectivamente.

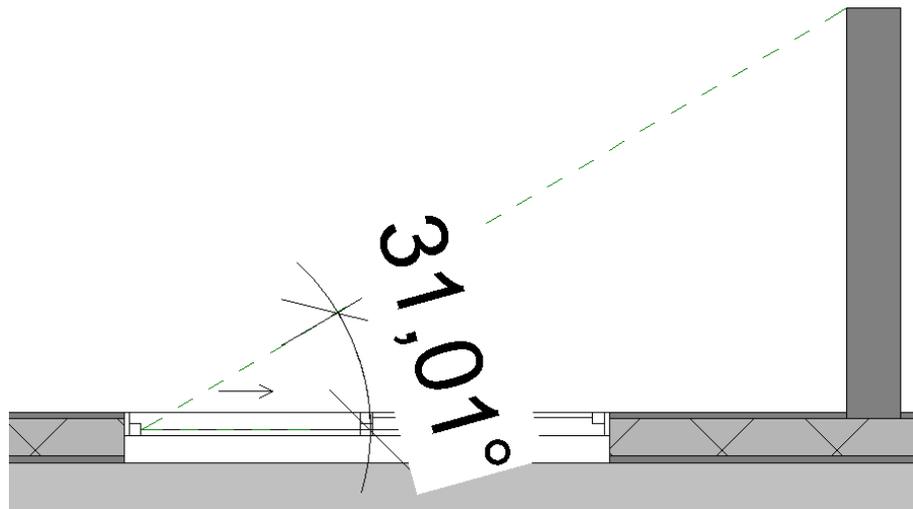


Figura 55 - Demonstração de um ângulo horizontal de sombreamento do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

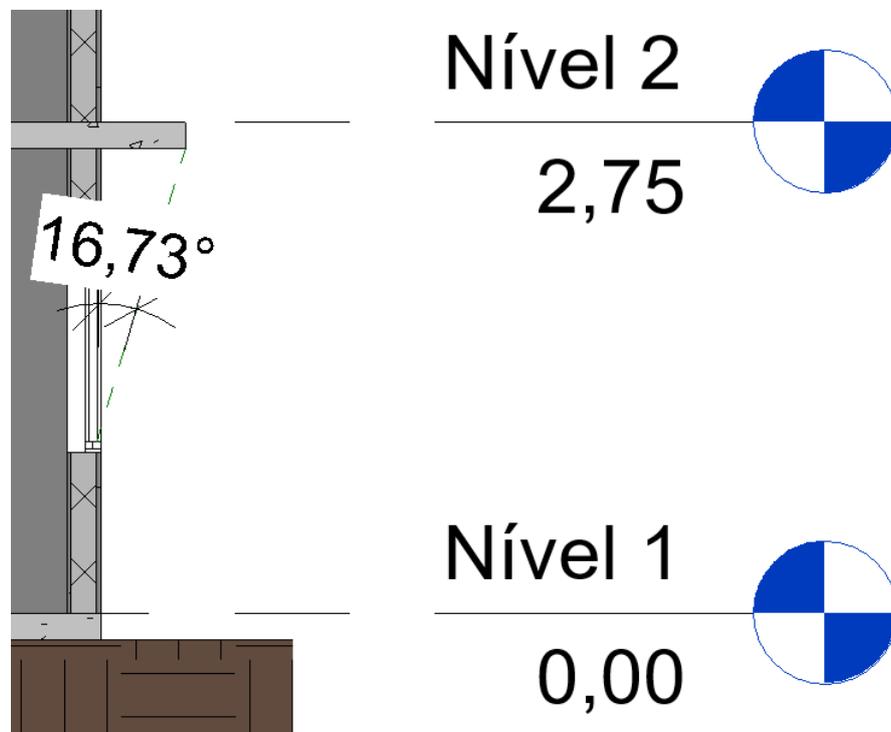


Figura 56 - Demonstração de um ângulo vertical de sombreamento do objeto de estudo
Fonte: AUTOR, 2022.

A transmitância térmica é um parâmetro calculado pelo Revit, mas foi observado que o cálculo não considera a resistência superficial externa (R_{se}) e interna (R_{si}). A resistência térmica calculada pelo Revit foi a de superfície para superfície (R_t), não a de ambiente para ambiente (R_T). A transmitância térmica calculada pelo Revit não pode ser utilizada na avaliação de eficiência energética do PBE Edifica, porque a ferramenta não segue os procedimentos da NBR 15.220-2 (ABNT, 2005).

Outro problema observado é que a ferramenta não pode representar elementos vazados, como os tijolos que compõem as paredes do objeto de estudo.

Conseqüentemente, o Revit não calcula a R_t que deveria ser calculada, considerando as resistências das câmaras de ar dos tijolos. A partir dessa observação, foi verificado que o Revit opera de maneira similar ao EnergyPlus, é possível obter os valores corretos de R_t , mas é necessário modelar os sistemas realizando o cálculo da espessura para modelos equivalentes.

Durante a modelagem de dados foram inseridas as propriedades térmicas dos materiais (*i.e.* condutividade térmica; calor específico; e densidade), dados necessários para o cálculo da capacidade e da transmitância térmica. O Revit não permitiu a inserção dos dados em nenhuma das tabelas, foi preciso consultar os valores dentro do navegador da ferramenta. Esse fator dificultou a avaliação de eficiência energética da envoltória, porque houve a necessidade de inspecionar todos os materiais e elementos da alvenaria e da cobertura do modelo BIM.

Em relação à condição do piso – contato com o solo ou zona sobre pilotis – e condição da cobertura – exposta ao ambiente externo – não foram identificadas maneiras para automatizar a obtenção dessas informações. Foi necessário analisar o modelo BIM a partir dos cortes, conforme demonstra a Figura 57.



Figura 57 - Análise da condição do piso e da cobertura do protótipo de grandes escritórios
Fonte: AUTOR, 2022.

A partir das notas-chave foi possível identificar a condição de isolamento no piso. O concreto moldado in loco (*i.e.* nota-chave 03310) foi o único material que

constituiu o piso, ou seja, esse elemento não apresentou isolamento térmico. Essa condição foi observada de duas formas: a partir do corte do modelo (Figura 58) e a partir da tabela de levantamento do material do piso (Figura 59).

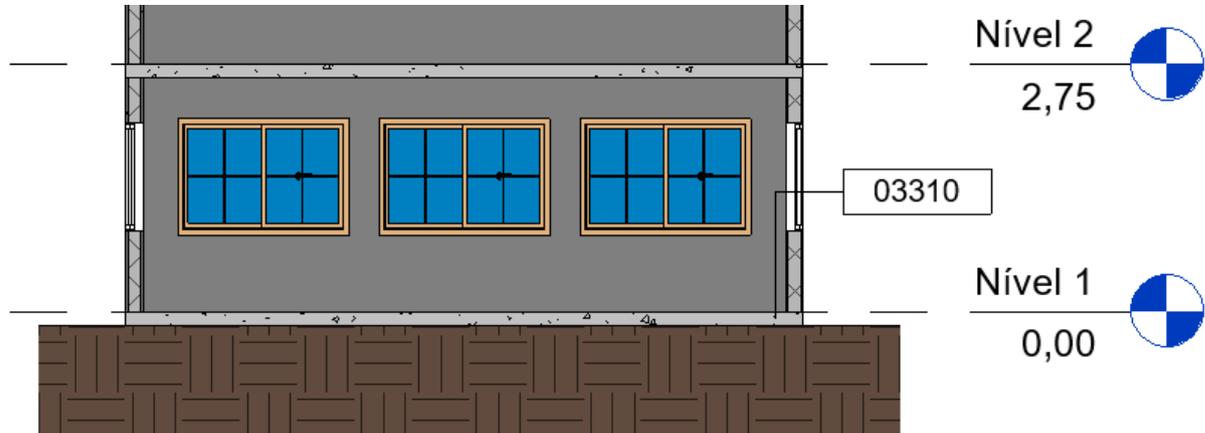


Figura 58 - Análise da condição de isolamento térmico a partir do corte transversal
Fonte: AUTOR, 2022.

<Levantamento do material do piso>				
A	B	C	D	E
Tipo	Nível	Material: Nome	Material: Nota-chave	Material: Descrição
Laje de concreto	Nível 1	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de concreto	Nível 2	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de concreto	Nível 3	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de concreto	Nível 4	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de concreto	Nível 5	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de cobertura	Nível 6	Concreto moldado in loco	03310	Concreto para a laje
Laje de cobertura	Nível 6	Poliestireno expandido	07220	Espuma de poliestireno expandido

Figura 59 - Análise da condição de isolamento térmico a partir da tabela de levantamento do material
Fonte: AUTOR, 2022.

Conforme as observações das condições do piso e da cobertura, ficou claro que o modelo BIM resultante do procedimento, sem foco na avaliação de eficiência energética, não possibilitou a extração automática de todos os dados necessários para avaliar a envoltória.

Sobre o cálculo da área das zonas térmicas, o próprio Revit realizou os cálculos e foi possível incluir esses valores em uma tabela gerada pela ferramenta. Para tanto, bastou executar a divisão das zonas térmicas e gerar a tabela e a própria ferramenta forneceu os valores. Outros dados, como o tipo de zona, orientação, DPE, DPI e pé-direito foram extraídos a partir da tabela, conforme demonstra a Figura 60.

<Tabela de zonas térmicas>					
A	B	C	D	E	F
Nome	Nível	Área	Carga de iluminação	Carga de potência	Altura
01-ZTP-N	Nível 1	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
02-ZTP-L	Nível 1	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
03-ZTP-S	Nível 1	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
04-ZTP-O	Nível 1	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
05-ZTP-N	Nível 2	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
06-ZTP-L	Nível 2	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
07-ZTP-S	Nível 2	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
08-ZTP-O	Nível 2	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
09-ZTP-N	Nível 3	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
10-ZTP-L	Nível 3	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
11-ZTP-S	Nível 3	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
12-ZTP-O	Nível 3	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
13-ZTP-N	Nível 4	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
14-ZTP-L	Nível 4	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
15-ZTP-S	Nível 4	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
16-ZTP-O	Nível 4	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
17-ZTP-N	Nível 5	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
18-ZTP-L	Nível 5	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
19-ZTP-S	Nível 5	78,75 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60
20-ZTP-O	Nível 5	16,02 m ²	6,70 W/m ²	9,60 W/m ²	2,60

Figura 60 - Dados das zonas térmicas do objeto de estudo extraídos do Revit
Fonte: AUTOR, 2022.

A partir do estudo exploratório foram observadas duas grandes limitações: a ferramenta não calculou todos os dados de forma automática (*i.e.* limitação vinculada à ferramenta BIM); e nem todos os dados foram obtidos diretamente do modelo BIM (*i.e.* limitação relacionada ao processo de modelagem BIM). O Quadro 10 apresenta uma síntese relacionada à obtenção de todos os parâmetros necessários para a aplicação do metamodelo.

Parâmetro	Observação
Área	Calculado pelo Revit após a inserção da zona térmica e obtido diretamente do modelo BIM a partir da tabela de zonas térmicas.
Orientação solar	Não foi determinado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico para a inserção, mas foi obtido diretamente do modelo BIM pela tabela de zonas térmicas a partir da inclusão do dado em um parâmetro existente.
Pé-direito	Não foi determinado pelo Revit, mas o dado foi inserido no parâmetro de altura da zona térmica e foi obtido diretamente do modelo BIM a partir da tabela de zonas térmicas.
Tipo de zona	Não foi determinado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico, mas foi obtido diretamente do modelo BIM pela tabela de zonas térmicas a partir da inserção do dado em um parâmetro existente.

AHS – Ângulo horizontal de sombreamento	Calculado pelo Revit, mas houve a necessidade de analisar a planta de piso e o Revit não apresentou um parâmetro específico para a inserção do dado.
AOV – Ângulo de obstrução vizinha	Calculado pelo Revit, mas houve a necessidade de analisar a planta de piso e o corte e o Revit não apresenta um parâmetro específico para a inserção do dado.
AVS – Ângulo vertical de sombreamento	Calculado pelo Revit, mas houve a necessidade de analisar o corte do modelo e o Revit não apresentou um parâmetro específico para a inserção do dado.
PAF – Percentual de abertura da fachada	Não foi calculado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico, o valor foi determinado manualmente com base em outros dados calculados pelo Revit.
apar – Absortância da parede externa	Não foi determinado pelo Revit, mas o dado foi inserido no parâmetro de absorção da parede e obtido diretamente do modelo BIM a partir da tabela de parede.
CTpar – Capacidade térmica da parede externa	Não foi calculado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico, o valor precisou ser calculado manualmente com base nas propriedades térmicas dos materiais e informações do sistema construtivo.
Upar – Transmitância térmica da parede externa	Calculado pelo Revit, mas não foi possível utilizar o dado, o valor precisou ser calculado manualmente com base nas propriedades térmicas dos materiais e informações do sistema construtivo.
acob – Absortância da cobertura	Não foi determinado pelo Revit, mas o dado foi inserido no parâmetro de absorção do telhado e obtido diretamente do modelo a partir da tabela de telhado.
CTcob – Capacidade térmica da cobertura	Não foi calculado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico, o valor precisou ser calculado manualmente com base nas propriedades térmicas dos materiais e informações do sistema construtivo.
Ucob – Transmitância térmica da cobertura	Calculado pelo Revit, mas não foi possível utilizar o dado, o valor precisou ser calculado manualmente com base nas propriedades térmicas dos materiais e informações do sistema construtivo.
FS – Fator solar	Não foi determinado pelo Revit, mas o dado foi inserido no parâmetro de coeficiente de ganho de calor solar da janela e obtido diretamente do modelo a partir da tabela de janelas.
Uvid – Transmitância térmica do vidro	Não foi determinado pelo Revit, mas o dado foi inserido no parâmetro de coeficiente de transferência de calor da janela e obtido diretamente do modelo a partir da tabela de janelas.
Cobertura exposta	Não foi determinado pelo Revit e não apresentou um parâmetro específico, foi obtido a partir da análise do modelo.
Contato com o solo	Não é um parâmetro nativo do Revit, mas pode ser extraído desde que o dado seja inserido em algum parâmetro existente. Foi necessário analisar o modelo para determinar essa condição.
Isolamento no piso	É possível extrair esse dado a partir da tabela de materiais do piso, mas é necessário inserir as camadas e definir os materiais e as notas-chave. Foi necessário analisar o modelo para determinar essa condição.
Zona sobre pilotis	Não é um parâmetro nativo do Revit, mas pode ser extraído desde que o dado seja inserido em algum parâmetro existente. Foi necessário analisar o modelo para determinar essa condição.
DPI – Densidade de potência de iluminação	É um parâmetro nativo do Revit que pode ser extraído a partir da tabela de espaço, mas é necessário editar o valor do parâmetro. Foi obtido a partir da tabela de espaço.
DPE – Densidade de potência de equipamentos	É um parâmetro nativo do Revit que pode ser extraído a partir da tabela de espaço, mas é necessário editar o valor do parâmetro. Foi obtido a partir da tabela de espaço.
Horas de ocupação	Não é um parâmetro nativo do Revit, mas pode ser extraído desde que o dado seja inserido em algum parâmetro existente. Esse dado não precisa ser obtido do modelo porque a INI-C dita esse valor.

Quadro 10 - Síntese dos dados obtidos do modelo BIM do objeto de estudo

Fonte: AUTOR, 2022.

O estudo exploratório demonstrou que a modelagem de dados apresentou uma relevância superior à modelagem geométrica, porque os dados não obtidos diretamente do modelo BIM foram em decorrência da ausência de parâmetros de projeto. A partir dessa observação foi criada a hipótese que a avaliação de eficiência energética de projetos desenvolvidos em BIM pode ser acelerada, desde que o template apresente parâmetros para a inserção de todos os dados necessários na avaliação da envoltória.

A partir do estudo exploratório, foi notado que o modelo BIM necessitou de elementos em ND 300 para a avaliação de eficiência energética da envoltória. Conforme BIM Forum (2019), os elementos de ND 200 apresentam dados e informações estimadas e, para análises preliminares de eficiência energética, esse nível pode ser o suficiente. Entretanto, para a etiquetagem do PBE Edifica são necessários dados precisos, que por definição são enquadrados no ND 300.

Foi constatado que o modelo BIM do protótipo representativo de grandes escritórios apresentou uma dispersão de dados. Houve a necessidade de gerar uma série de tabelas e analisar diversas plantas, cortes, vistas e, também, navegar pela interface da ferramenta para consultar dados que não puderam ser extraídos a partir das tabelas do Revit. Em suma, foi possível avaliar a eficiência energética da envoltória do modelo BIM do estudo exploratório, mas a dispersão dos dados prejudicou a execução da avaliação, principalmente pelos seguintes aspectos:

- a) Para calcular a capacidade e a transmitância térmica foi necessário inspecionar todos os materiais e elementos da alvenaria e cobertura porque o Revit não permitiu a inclusão das propriedades térmicas nas tabelas;
- b) O Revit não calculou o FF e o PAF, esses dados foram calculados manualmente a partir de outros dados fornecidos pela ferramenta;
- c) A orientação solar e o tipo de zona térmica não apresentaram campos específicos para a inserção, foi necessário adotar um sistema de acrônimos e incorporar esses dados aos nomes das zonas térmicas (e.g. a zona térmica perimetral orientada para o norte do pavimento térreo foi nomeada como “01-ZTP-N”);
- d) Os valores de área envidraçada foram calculados manualmente, porque a forma como o Revit realizou os cálculos não atende as diretrizes para a avaliação da envoltória;

- e) Os ângulos de sombreamento e a condição do piso e da cobertura precisaram ser obtidos a partir da análise das plantas e dos cortes.

A partir desse estudo foi concluído que as edificações desenvolvidas em BIM podem apresentar problemas no processo de etiquetagem do PBE Edifica, principalmente por conta da obtenção manual de dados. Portanto, existe a necessidade da intervenção manual no modelo BIM para a extração e cálculo dos dados, sendo o FF e o PAF exemplos dessa afirmação.

A principal conclusão do estudo exploratório foi que a quantidade de dados obtidos diretamente do modelo BIM varia em função do processo de modelagem BIM adotado. Existem diversas maneiras de realizar a modelagem geométrica e de inserir dados no modelo BIM e, na presente data, não foram identificados procedimentos e específicos para o desenvolvimento de modelos BIM voltados para a avaliação de eficiência energética da envoltória.

4.2 Considerações sobre o estudo de caso

A partir da hipótese desenvolvida após o estudo exploratório, foram idealizadas diretrizes de modelagem BIM para desenvolver um modelo focado na avaliação de eficiência energética da envoltória.

Seguindo as diretrizes de modelagem BIM foi possível obter dados que o Revit não calculou durante o estudo exploratório. A área envidraçada foi calculada pela ferramenta a partir de uma fórmula criada, resultante da multiplicação entre a “Altura do vidro” e a “Largura do vidro” e, ainda, multiplicado pelo número de folhas de vidro da janela. Portanto, o Revit foi capaz de calcular o dado da forma necessária para a avaliação da envoltória, conforme demonstra a Figura 61.

Resultados da análise		
Altura do vidro	0,8063	=
Largura do vidro	0,6106	=
Área da esquadria	2,610	= Altura * Largura
Área envidraçada	1,969	= 4 * (Altura do vidro) * (Largura do vidro)

Figura 61 - Cálculo automático da área envidraçada
Fonte: AUTOR, 2022.

Além da área envidraçada, seguindo as diretrizes de modelagem, foi possível extrair a localização por ambiente, as orientações, o FS, a transmitância térmica, e os ângulos de sombreamento das janelas, conforme demonstra a Figura 62.

<Tabela de janela>											
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Tipo	Nível	Marca	Ambiente	Orientação	Área env	Fator so	Transmitância	AHS 1	AHS 2	AHS	AVS
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 1	1	CEART	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	14,30°	0,00°	7,15°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 1	2	CEART	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	24,37°	0,00°	12,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 1	3	CEART	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	40,25°	0,00°	20,13°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 1	4	CEAU	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	40,25°	0,00°	20,13°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 1	5	CEAU	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	24,37°	0,00°	12,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	6	LINSE	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	7	LINSE	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	8	LINSE	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	9	LINSE	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	0,00°	21,10°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	10	LINSE	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	23,23°	32,72°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	11	LINSE	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	36,17°	39,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	12	ATELIÉ 01	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	40,25°	41,23°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	13	ATELIÉ 01	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	36,17°	39,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	14	ATELIÉ 01	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	11,94°	0,00°	5,97°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 2	15	ATELIÉ 01	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	14,95°	0,00°	7,48°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	16	ATELIÉ 03	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	17	ATELIÉ 03	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	18	ATELIÉ 03	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	0,00°	0,00°	0,00°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	19	ATELIÉ 03	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	0,00°	21,10°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	20	ATELIÉ 03	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	23,23°	32,72°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	21	ATELIÉ 03	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	36,17°	39,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	22	ATELIÉ 02	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	40,25°	41,23°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	23	ATELIÉ 02	SUL	1,97 m ²	0,75	3,5	42,20°	36,17°	39,19°	17,39°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	24	ATELIÉ 02	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	11,94°	0,00°	5,97°	30,81°
Janela com 4 folhas de vidro	Nível 3	25	ATELIÉ 02	NORTE	1,97 m ²	0,75	3,5	14,95°	0,00°	7,48°	30,81°

Figura 62 - Valores extraídos das janelas do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

O valor do FF foi também calculado pela ferramenta, a partir do uso de uma fórmula, resultante da razão entre a “Área da envoltória” e o “Volume bruto” da massa conceitual. Foi verificado que por padrão do Revit, alguns dados não são calculados – aspecto constatado no estudo exploratório – mas a partir de um procedimento de modelagem adequado foi possível contornar essa questão. A Figura 63 apresenta o valor do FF calculado pelo Revit.

<Tabela de massa>					
A	B	C	D	E	F
Tipo	Área bruta	Área bruta do piso	Área da envoltória	Volume bruto	Fator de Forma
FATOR DE FORMA:	1088,57 m ²	182,44 m ²	906,14 m ²	2074,76 m ³	0,436744

Figura 63 - Cálculo automático do fator de forma
Fonte: AUTOR, 2022.

O problema observado no estudo exploratório da representação gráfica dos tijolos furados não foi solucionado no estudo de caso. Entretanto, a partir da nota-chave, foi possível associar um identificador específico para cada material que constitui o modelo BIM. Embora a representação gráfica no corte da parede não demonstre as câmaras de ar dos blocos, ainda assim foi possível identificar o material, as dimensões e as características físicas e térmicas.

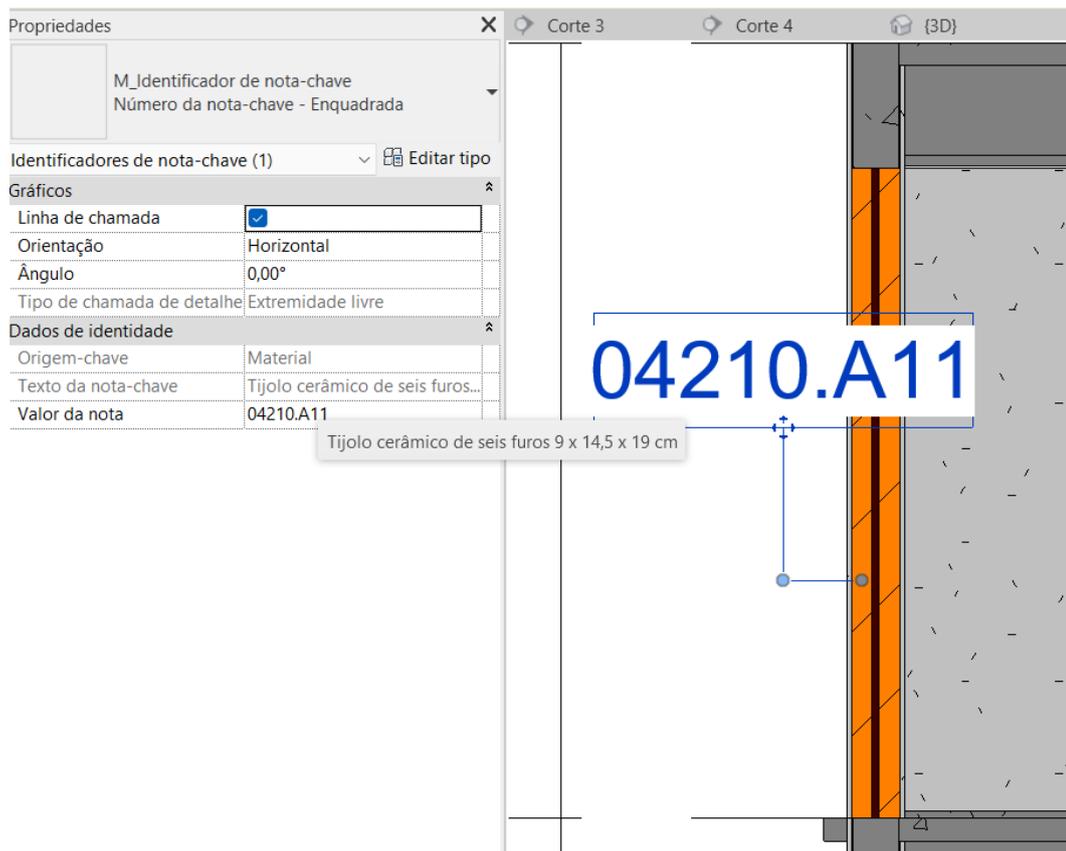


Figura 64 - Identificação do bloco cerâmico a partir do parâmetro de nota-chave
Fonte: AUTOR, 2022.

A partir da tabela quantitativa das paredes foram extraídas as localizações por ambiente, a orientação, o pavimento, a área por fachada da parede, a absorvância e a transmitância e capacidade térmica. A Figura 65 apresenta os valores apresentados na tabela das paredes do Revit.

<Tabela de parede>							
A	B	C	D	E	F	G	H
Tipo	Ambiente	Orientação	Restrição	Área	Absortância	Transmitância	Capacidade
.Alvenaria externa 25 cm	CEART	LESTE	Nível 1	32,30 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	CEART	NORTE	Nível 1	21,18 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	CEART	SUL	Nível 1	19,03 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	CEAU	NORTE	Nível 1	7,06 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	CEAU	OESTE	Nível 1	20,02 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	CEAU	SUL	Nível 1	12,97 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 01	NORTE	Nível 2	13,82 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 01	OESTE	Nível 2	32,30 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 01	SUL	Nível 2	12,97 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	LINSE	LESTE	Nível 2	32,22 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	LINSE	NORTE	Nível 2	19,88 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	LINSE	OESTE	Nível 2	6,04 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	LINSE	SUL	Nível 2	19,03 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 02	NORTE	Nível 3	13,58 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 02	OESTE	Nível 3	32,30 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 02	SUL	Nível 3	12,97 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 03	LESTE	Nível 3	38,34 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 03	NORTE	Nível 3	19,88 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 03	OESTE	Nível 3	6,04 m ²	0,3	0,8	184
.Alvenaria externa 25 cm	ATELIÉ 03	SUL	Nível 3	19,03 m ²	0,3	0,8	184

Figura 65 - Valores extraídos das paredes do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

Durante a modelagem do sistema de cobertura foi observado um aspecto que não pôde ser verificado durante o estudo exploratório, em decorrência da geometria simples do protótipo representativo de grandes escritórios. O sistema de cobertura do Anexo FAUrb apresentou uma laje de concreto, uma camada de isolamento térmico de lã de rocha, uma câmara de ar e telhas metálicas com inclinação de 12°.

Não foi possível modelar a cobertura do Anexo FAUrb em uma única família de telhado – conforme executado no estudo exploratório – pois a inclinação da telha foi aplicada em todas as camadas de materiais, conforme a Figura 66. A laje, embora um componente da cobertura, foi modelada separadamente durante a inserção de elementos estruturais, por isso não apresentou inclinação como a camada de lã de rocha.



Figura 66 - Cobertura oeste (inclinada) do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

O sistema de cobertura precisou ser modelado camada por camada, não foi possível utilizar apenas um elemento composto por várias camadas de materiais, ou seja, a laje de concreto, a camada de lã de rocha e as telhas foram inseridas separadamente. Por esse motivo, não foi criado um elemento único para o sistema de cobertura, como foi realizado com as paredes. O resultado da modelagem feita camada por camada, para corrigir o problema da inclinação, pode ser visualizado na Figura 67.



Figura 67 - Cobertura oeste do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

A modelagem, camada por camada, da cobertura corrigiu o problema da inclinação, mas criou um novo problema. Como os materiais que compõem a cobertura foram fragmentados em vários elementos distintos, não existia mais uma

família para incorporar os valores de capacidade e transmitância térmica do sistema de cobertura. Por isso foi utilizado a “Montagem”, para unir os elementos e inserir as propriedades térmicas na família unificada da montagem da cobertura. A Figura 68 demonstra a tabela de montagem do sistema de cobertura, com os valores das propriedades térmicas.

<Tabela de montagem>			
A	B	C	D
Tipo	Absortância	Capacidade Térmica [kJ/m ² .K]	Transmitância térmica [W/m ² .K]
Cobertura Leste	0,2	256,5	0,5
Cobertura Oeste	0,2	256,5	0,5

Figura 68 - Valores extraídos da cobertura do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

Em um primeiro momento, durante o estudo exploratório, a modelagem de dados apresentou relevância, frente à modelagem geométrica, para a obtenção dos dados. Entretanto, foi constatado que essa afirmação não é absoluta e o problema observado durante a modelagem da cobertura inclinada demonstrou que as propriedades térmicas do elemento não foram condizentes com a representação gráfica da cobertura. Mas foi possível contornar essa limitação a partir da função de montagem e, a partir do parâmetro de nota-chave, também foi possível descrever a composição do sistema de cobertura.

Foi realizada a tentativa de parametrizar as janelas e obter os ângulos de sombreamento de forma automática. Entretanto, não foram identificadas formas que relacionassem as janelas aos elementos circundantes que originam os ângulos de sombreamento. Os ângulos de sombreamento precisaram ser mensurados manualmente a partir das cotas angulares, conforme demonstra a Figura 69 e Figura 70.

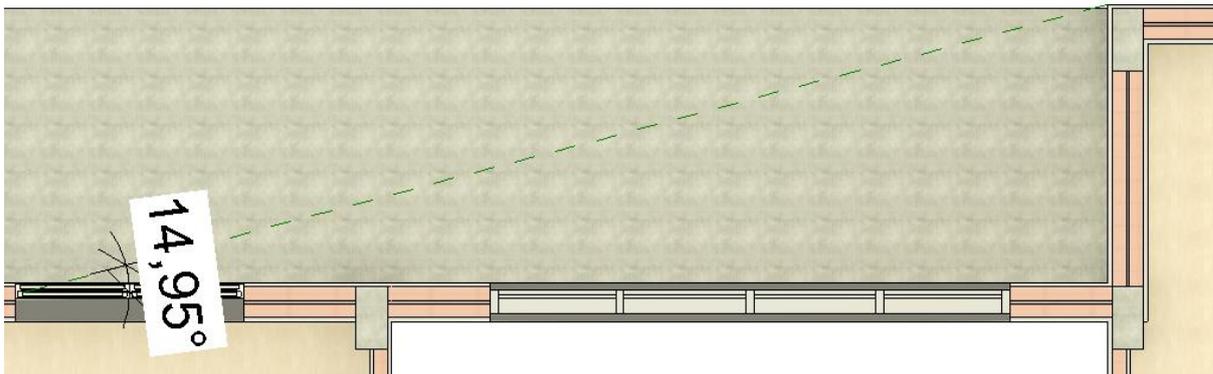


Figura 69 - Demonstração de ângulo horizontal de sombreamento do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.



Figura 70 - Demonstração de ângulo vertical de sombreamento do Anexo FAUrb
Fonte: AUTOR, 2022.

O PAF não pôde ser obtido a partir de fórmulas, como o FF e a área envidraçada. Foi notado que o PAF depende de parâmetros das janelas (*i.e.* área envidraçada) e das paredes externas (*i.e.* área da fachada), ou seja, de duas famílias distintas. No caso do FF e da área envidraçada, não houve a necessidade de trabalhar com parâmetros de famílias diferentes; para o FF foram utilizados parâmetros da massa conceitual; e para a área envidraçada foram utilizados parâmetros das janelas. Portanto, foi constatado nesse estudo a impossibilidade de criar fórmulas para obter dados que dependem de mais de um elemento para serem calculados.

Como o valor do PAF não foi calculado pelo Revit, houve a necessidade de calcular os valores de forma externa, em uma planilha Excel, a partir de dados fornecidos pela ferramenta. A Figura 71 apresenta a planilha com os valores de PAF.

Pavimento	Ambiente	Zona térmica	Abertura?	Área da fachada [m ²]	Área envidraçada [m ²]	PAF
1	CEART	1	Não	-	-	0,00%
1	CEART	2	Não	-	-	0,00%
1	CEART	3	Sim	26,86	5,91	21,99%
1	CEAU	4	Sim	18,19	3,94	21,65%
1	CEAU	5	Sim	31,79	10,28	32,35%
1	CEAU	6	Sim	18,48	9,96	53,90%
2	Linse	7	Sim	27,71	5,91	21,32%
2	Linse	8	Não	-	-	0,00%
2	Linse	9	Não	-	-	0,00%
2	Linse	10	Não	-	-	0,00%
2	Linse	11	Sim	26,86	5,91	21,99%
2	Linse	12	Não	-	-	0,00%
2	Linse	13	Não	-	-	0,00%
2	Linse	14	Não	-	-	0,00%
2	Ateliê 1	15	Sim	18,19	3,94	21,65%
2	Ateliê 1	16	Não	-	-	0,00%
2	Ateliê 1	17	Sim	18,48	3,94	21,31%
3	Ateliê 3	18	Sim	27,71	5,91	21,32%
3	Ateliê 3	19	Não	-	-	0,00%
3	Ateliê 3	20	Sim	26,86	5,91	21,99%
3	Ateliê 3	21	Não	-	-	0,00%
3	Ateliê 3	22	Não	-	-	0,00%
3	Ateliê 2	23	Sim	18,19	3,94	21,65%
3	Ateliê 2	24	Não	-	-	0,00%
3	Ateliê 2	25	Sim	18,48	3,94	21,31%

Figura 71 - Planilha de cálculo do PAF
Fonte: AUTOR, 2022.

A partir do estudo de caso foi constatada a possibilidade de obtenção de todos os dados necessários para a avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória – diretamente do modelo BIM – a partir da criação e uso de parâmetros específicos e da inserção dos dados em uma única família no modelo BIM. Todos os dados foram centralizados em uma única tabela¹² gerada pelo Revit.

Com base na experiência do pesquisador, foi notado que o desenvolvimento do modelo BIM do estudo de caso foi complexo, em comparação ao estudo exploratório. Esse aspecto ocorreu não apenas pelas diferenças existentes entre as características dos objetos de estudo, mas principalmente pela quantidade e detalhe dos procedimentos realizados.

¹²

https://drive.google.com/open?id=1WQhCehWtUyGh2m5BvOhiMsOzy4gJ6bdI&authuser=lufmuta%40gmail.com&usp=drive_fs

A partir da criação dos parâmetros de fórmula, foi verificada a possibilidade de obter alguns dados de forma automática que, durante o estudo exploratório, não puderam ser obtidos. Os valores de área envidraçada das janelas e o fator de forma da edificação foram calculados pela ferramenta, mas não foi possível realizar o mesmo procedimento para o PAF. Portanto, o uso da plataforma BIM não possibilitou a obtenção automática de todos os dados necessários para a avaliação da envoltória.

Foi observado que os elementos do modelo BIM apresentaram ND 300, nem mesmo o fator de forma, obtido a partir da massa conceitual apresentou ND inferior. Entretanto, no contexto do estudo de caso, foi observado que nem todos os elementos precisariam ter sido modelados em ND 300. As paredes internas e as paredes externas e janelas das áreas de permanência transitória e as portas internas poderiam ter sido modeladas em ND 200 (e.g. as paredes internas poderiam ter sido representadas sem as camadas de materiais e demais propriedades), pois os dados inseridos nesses elementos não foram utilizados durante a avaliação da envoltória. Mas essa afirmação é válida apenas dentro do contexto desta pesquisa. Portanto, o requisito mínimo que um modelo BIM precisa para que a avaliação da envoltória seja realizada é que os elementos apresentem ND 300.

Apesar das limitações apresentadas, todos os dados foram obtidos diretamente do modelo BIM, a partir de uma única tabela de zonas térmicas. Embora o preenchimento dos valores no metamodelo ter sido manual, a tabela com os dados centralizados facilitou a avaliação e classificação de eficiência energética, pois mitigou a necessidade de navegar pela interface da ferramenta e consultar múltiplas tabelas. A visualização dos dados necessários no preenchimento do metamodelo foi facilitada e, possivelmente, o mesmo ocorreria durante a avaliação da envoltória. Considerando que o metamodelo poderá incorporar planilhas, a plataforma BIM apresenta um potencial ainda maior, pois os dados paramétricos do modelo poderão ser extraídos para planilhas eletrônicas e importados diretamente no metamodelo.

4.3 Avaliação das diretrizes de modelagem BIM

As diretrizes de modelagem BIM foram avaliadas considerando o impacto do modelo BIM no seguinte contexto: “o modelo BIM desenvolvido a partir das diretrizes idealizadas nessa pesquisa impactou positivamente a avaliação simplificada da envoltória?”.

A quantidade de dados extraídos do modelo BIM do estudo exploratório e do estudo de caso foram observadas. Em virtude dessa dissertação visar a solução de um problema prático do mundo real, foi considerada a pertinência do artefato dentro do contexto do projetista (*i.e.* responsável pelo desenvolvimento do modelo BIM) e do OIA (*i.e.* responsável pela avaliação e classificação de eficiência energética). Foi observado que existem diversas possibilidades para desenvolver um modelo BIM e, para cada ação tomada durante a modelagem, existem desfechos positivos ou negativos, tanto para o projetista quanto para o OIA.

Considerando o contexto do projetista, são utilizadas diretrizes de modelagem para o desenvolvimento do modelo BIM. O impacto que o modelo BIM apresenta, dentro da avaliação de eficiência energética, varia em função dos procedimentos de modelagem adotados. No âmbito do OIA, a mesma afirmação é válida porque a avaliação de eficiência energética é mais dinâmica quando os dados necessários são apresentados de forma organizada e centralizada, conforme demonstrado no estudo de caso.

No estudo exploratório foi observado que 14 dos 23 dados necessários para a avaliação simplificada da envoltória não foram obtidos das tabelas do Revit. Também foi observada a necessidade de realizar cálculos externos à ferramenta e analisar cortes e plantas de piso do modelo BIM, fatores que aumentam o tempo de avaliação e as chances de ocorrência de erros humanos, principalmente por parte do OIA.

Considerando o lado do projetista, não foi necessário criar parâmetros específicos e notas-chave; vincular parâmetros à elementos; definir propriedades e ângulos de sombreamento; criar tabelas específicas; realizar a divisão de zonas térmicas; e centralizar os dados nas zonas térmicas. Entretanto, no contexto do OIA, foram observados os seguintes pontos:

- a) os ângulos de sombreamento precisaram ser mensurados a partir das plantas de piso e cortes da construção do modelo BIM;
- b) o PAF não foi obtido diretamente do modelo BIM, tendo sido necessário calcular o valor de forma externa ao Revit;
- c) as capacidades térmicas das paredes e cobertura não foram obtidas diretamente do modelo BIM, tendo sido necessário consultar as propriedades térmicas dos materiais na interface do Revit;

- d) as transmitâncias térmicas das paredes e cobertura foram calculadas pelo Revit, mas não puderam ser utilizadas na avaliação da envoltória, tendo sido necessário consultar as propriedades térmicas dos materiais na interface do Revit;
- e) os parâmetros da categoria de iluminação e ganhos (*i.e.* condição da cobertura; e condição do piso) não foram obtidos de forma automática, tendo sido necessário analisar o modelo BIM.

No estudo de caso foi observado que todos os dados necessários na avaliação simplificada da envoltória foram inseridos nas zonas térmicas e extraídos a partir de uma única tabela gerada pelo Revit. Considerando o OIA, não houve a necessidade de analisar o modelo BIM para extrair os dados de projeto da edificação, o único aspecto em que houve uma intervenção manual foi na ocasião da inserção de dados no metamodelo. Todavia, considerando o projetista, foram observadas as seguintes necessidades:

- a) criar todos os parâmetros específicos e notas-chaves;
- b) associar os parâmetros (*e.g.* transmitância térmica) aos elementos (*e.g.* família de paredes);
- c) criar e definir propriedades específicas de materiais e elementos (*e.g.* inserir o valor da transmitância térmica na parede);
- d) criar e organizar tabelas;
- e) mensurar os ângulos de sombreamento;
- f) realizar a divisão e a inserção das zonas térmicas no modelo BIM;
- g) analisar o modelo BIM e organizar os dados dispersos em uma única tabela.

Com base nos estudos realizados ficou claro que o risco de retrabalho e de falhas humanas foi minimizado pelo artefato. Entretanto, para desenvolver um modelo BIM com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória, houve a necessidade de realizar sete etapas a mais do que o observado no estudo exploratório.

Em suma, foram vislumbrados dois cenários possíveis: no primeiro o projetista não utiliza diretrizes de modelagem, com foco na avaliação da envoltória, e desenvolve um modelo BIM que possivelmente apresenta dados dispersos. Tal caso

culmina na necessidade de o OIA realizar uma série de intervenções manuais para extrair e calcular os dados de projeto do modelo BIM, cenário observado no estudo exploratório.

No segundo cenário o projetista utiliza diretrizes de modelagem BIM, com foco na avaliação da envoltória, e desenvolve um modelo BIM com todos os dados organizados em uma única tabela gerada pelo Revit. Tal cenário, embora apresente sete processos a mais para o projetista, resulta em um modelo BIM em que o OIA não precisa realizar diversas intervenções manuais para extrair os dados de projeto.

Para avaliar com mais clareza o artefato, adotou-se o RAC como balizador para a idealização e construção de uma escala de impacto para avaliar o modelo BIM frente às necessidades dessa pesquisa. Foram idealizados três níveis de modelo BIM, são estes: nível 0; nível 1; e nível 2. Quanto maior o nível na escala, maior a riqueza de detalhes e maior a complexidade para desenvolver o modelo.

O aumento de nível na escala também acarreta em mais tempo para desenvolver o modelo BIM e menos tempo para avaliar a eficiência energética da envoltória; porque o número de processos de modelagem e de extração de dados aumenta ou diminui em virtude da riqueza e da organização de dados no modelo BIM.

A Figura 72 apresenta a escala de níveis de modelos BIM e demonstra a relação entre as esferas do projetista e do OIA, tendo como ponto central o modelo BIM a ser desenvolvido pelo projetista e avaliado pelo OIA.

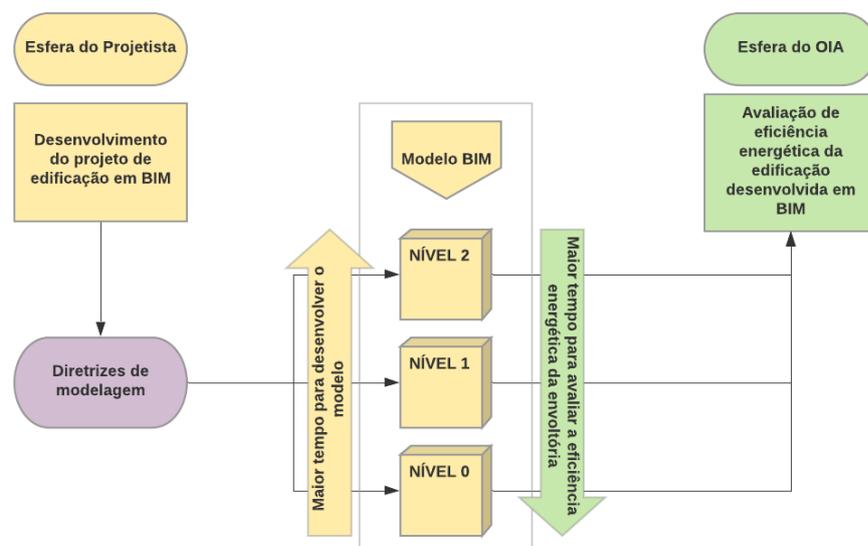


Figura 72 - Escala para avaliar o modelo BIM resultante do artefato de pesquisa
Fonte: AUTOR, 2022.

É essencial explicitar que os níveis não apresentaram uma relação equidistante entre si, no que tange o tempo e o esforço¹³ despendido no desenvolvimento do modelo BIM. Portanto, o esforço e o tempo necessários para o desenvolvimento de determinado nível de modelo BIM, não necessariamente possui uma relação direta para desenvolver um modelo BIM no nível subsequente.

O nível 0 foi referente ao modelo BIM contendo dados e informações mínimas exigidas pelo RAC. Esse nível é considerado um ponto neutro, não sendo positivo ou negativo para o OIA, porque trata-se de um modelo BIM que atende às exigências mínimas para a inspeção de projeto, considerando os critérios do RAC (INMETRO, 2021a). O nível 0 não contemplou o levantamento amostral – divisão de zonas térmicas e apresentação de dados adicionais, conforme a seção 2.1.2.3 – portanto esse nível apresentou a menor complexidade dentro da esfera do projetista.

Em virtude do levantamento amostral não ser uma atividade obrigatória para o projetista, nos modelos BIM em nível 0 a responsabilidade da divisão das zonas térmicas, identificação dos ângulos de sombreamento e obtenção de dados adicionais foi transferida para o OIA (*i.e.* identificação em projeto de todos os materiais e composição de sistemas construtivos; área envidraçada por zona térmica; área de absorvência térmica das fachadas e cobertura por zona térmica; transmitância e capacidade térmica das paredes e cobertura; e fator de forma). Portanto, o modelo BIM em nível 0 apresenta a maior complexidade para a esfera do OIA.

Embora o modelo BIM em nível 0 apresente os requisitos mínimos para a avaliação de eficiência energética da envoltória, ainda é oneroso obter todos os dados para a avaliação de eficiência energética da envoltória, aspecto comprovado pelo estudo exploratório. Portanto, é factível afirmar que as diretrizes de modelagem idealizadas resultaram em um modelo BIM que superou o nível 0, porque o modelo resultante do artefato considera mais aspectos do que os mínimos exigidos pelo RAC.

O RAC prevê a possibilidade de o projetista apresentar um levantamento amostral com dados adicionais aos compulsórios. A partir dessa possibilidade foi concebido o modelo BIM em nível 1, que apresenta uma riqueza maior de dados em relação ao modelo BIM em nível 0.

¹³ O esforço e o tempo foram apresentados de forma subjetiva, uma vez que uma das limitações do trabalho residiu na ausência de dados quantitativos de tempo. Não foi conduzido um estudo amostral para mensurar tal aspecto. Por outro lado, é factível afirmar que um procedimento com um número menor de processos é menos complexo e apresenta um risco menor de falhas humanas e retrabalhos.

O levantamento amostral apresenta uma série de dados adicionais, mas ainda existem dados que o RAC não exige (*i.e.* área envidraçada por zona térmica; capacidade e transmitância térmica das paredes e cobertura; e fator de forma). Conforme os estudos conduzidos nessa pesquisa, a área envidraçada exigiu uma parametrização das janelas e os valores de capacidade e transmitância térmica não foram calculados pelo Revit. Outro aspecto observado foi que o RAC, tratando-se do nível 1, considera a organização de dados de projeto (*e.g.* identificação de dados, divisão de zonas térmicas, etc.), mas não contempla aspectos da centralização de dados, significando que os dados do levantamento amostral continuam dispersos no modelo, em diversas instâncias distintas.

As diretrizes de modelagem dessa pesquisa abordaram mais aspectos do que o nível 1, sendo factível afirmar que o artefato desenvolvido foi satisfatório, dentro do contexto específico da redução da onerosidade na avaliação de eficiência energética da envoltória. É necessário reiterar que existe uma relação inversa entre o projetista e o OIA, no contexto da complexidade de desenvolvimento do modelo BIM e da inspeção de projeto. Quanto mais tempo e esforço são despendidos no desenvolvimento do modelo BIM, mais rápida é a inspeção de projeto.

Por fim, visto que o artefato desta pesquisa gerou um modelo BIM que apresentou um número maior de dados e, também, contou com um processo de centralização de dados, foi idealizado o nível 2 (*i.e.* modelo BIM desenvolvido pelas diretrizes desta pesquisa).

5 CONCLUSÕES

Foi analisada a aplicação de BIM na avaliação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C. A partir do Revit e com base em um procedimento de modelagem BIM, sem foco na avaliação de eficiência energética, foi desenvolvido um modelo BIM. Também foi efetuada a avaliação e classificação de eficiência energética da envoltória pelo método simplificado da INI-C.

A ferramenta BIM não calculou automaticamente todos os dados necessários para a avaliação da envoltória. O template de projeto do Revit não possui todos os parâmetros para a inserção dos dados. Durante a avaliação da eficiência energética, 61% dos dados não puderam ser extraídos de forma direta do modelo BIM e, também, houve uma dificuldade decorrente da descentralização de dados na etapa de inserção de dados no metamodelo. Os dados precisaram ser obtidos de forma manual e os dados que foram obtidos de forma direta do modelo BIM estavam dispersos e foram obtidos a partir de tabelas, cortes da construção, plantas de piso e painéis da interface gráfica da ferramenta.

Apesar do exposto, a plataforma BIM apresenta potencial para a avaliação de eficiência energética, em virtude da extração automatizada de dados, e os problemas observados no estudo exploratório favoreceram essa afirmação. Foi formulada a hipótese que a partir de diretrizes específicas de modelagem BIM, as dificuldades existentes na avaliação de eficiência energética referentes à obtenção e dados, particularmente da envoltória, podem ser reduzidas. A tecnologia BIM apresentou um potencial maior do que o observado no estudo exploratório e o teor dos problemas, relacionados ao processo de modelagem, corroboraram com a afirmação da necessidade de diretrizes de modelagem BIM com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória.

Com base nas constatações do estudo exploratório e, em conformidade com o problema de pesquisa, foram idealizadas diretrizes de modelagem para o desenvolvimento de modelos BIM com foco na avaliação simplificada da envoltória. As diretrizes de modelagem foram aplicadas em um estudo de caso, que resultou em um modelo BIM, com dados organizados e centralizados em uma única tabela, utilizada na avaliação de eficiência energética da envoltória. As constatações dessa fase reforçaram a hipótese de que a tecnologia BIM reduz as dificuldades para avaliar a eficiência energética das edificações. Para tanto, os projetos – especialmente os

desenvolvidos em BIM – precisam ter foco na avaliação de eficiência energética do PBE Edifica.

A pesquisa também demonstrou que a quantidade de dados extraídos diretamente de um modelo BIM está relacionado com a forma de modelagem e não necessariamente com as limitações da ferramenta empregada. O estudo de caso comprovou essa afirmação visto que, a partir das diretrizes de modelagem idealizadas nesta pesquisa, foi possível desenvolver um modelo BIM em que todos os dados foram extraídos de forma direta do modelo. Não houve a necessidade de realizar processos manuais para a extração dos dados necessários na avaliação e classificação da envoltória.

O Revit não calculou todos os dados de forma automática, mas durante a modelagem esses dados foram calculados, analisados, inseridos, organizados e centralizados no modelo BIM. Novamente, foi corroborada a hipótese da necessidade de processos com maior foco no desenvolvimento de projetos voltados para a etiquetagem de eficiência energética.

Conforme os modelos BIM foram desenvolvidos, notou-se que tanto o nível de detalhe geométrico quanto o de dados não-geométricos são relevantes. Com base nos estudos foi demonstrado que os elementos do modelo BIM necessitam, ao menos, de elementos em ND 300 para que possa ser realizada a avaliação simplificada da envoltória. Entretanto, alguns modelos BIM que apresentam elementos em ND 200 podem ser avaliados, desde que os elementos nesse nível não sejam essenciais para a avaliação (e.g. paredes internas das edificações).

Foi observado com base na fase de avaliação do artefato que o desenvolvimento de um modelo BIM, com foco específico na avaliação da envoltória, exige mais esforço por parte da esfera do projetista. Em contrapartida, a inspeção de projeto possivelmente seria realizada de forma mais dinâmica, reduzindo a onerosidade existente no contexto da etiquetagem do PBE Edifica.

A fase de avaliação do artefato também demonstrou que o projetista não precisa desenvolver o projeto com foco na avaliação de eficiência energética do PBE Edifica. O projeto pode ser submetido ao OIA com o mínimo de dados e informações solicitadas pelo RAC, mas o processo de etiquetagem demandará mais tempo, em comparação a avaliação de um modelo BIM desenvolvido com diretrizes focadas na etiquetagem do PBE Edifica. Essas afirmações demonstram que parte da onerosidade, existente no contexto da etiquetagem do PBE Edifica, depende

exclusivamente do projetista e das diretrizes de modelagem que foram adotadas para o desenvolvimento do modelo BIM.

O modelo BIM do estudo de caso, desenvolvido com foco na avaliação de eficiência energética da envoltória, foi avaliado e classificado com maior facilidade¹⁴ do que o modelo BIM do estudo exploratório, modelado com diretrizes sem foco específico na avaliação da envoltória. A afirmação corrobora com outros estudos citados na revisão de literatura, portanto, a dificuldade observada na etiquetagem do PBE Edifica pode ser reduzida a partir da adoção de diretrizes de modelagem com foco nesse tema.

A presente pesquisa recomenda a realização de mais estudos com foco em diretrizes e processos de desenvolvimento de modelos BIM voltados para a temática da etiquetagem do PBE Edifica, não apenas na avaliação da envoltória. Essa recomendação é pertinente principalmente pela compulsoriedade da etiquetagem, prevista para os próximos anos. Embora seja um avanço para a área, tal medida pode impactar negativamente a etiquetagem de eficiência energética, caso não existam procedimentos claros que viabilizem a operacionalização da etiquetagem em larga escala no país.

Também é necessário expor que esse estudo foi limitado ao programa de modelagem Revit da Autodesk. Embora essa ferramenta BIM, conforme demonstrado pela literatura, seja a mais utilizada no mundo, também são necessárias pesquisas que adotem outras ferramentas de modelagem BIM. Também são necessárias pesquisas que explorem os seguintes aspectos: interoperabilidade entre ferramentas BIM; cálculo automático de dados; e parametrização de famílias BIM.

Outra limitação desta pesquisa foi a ausência de um estudo amostral para mensurar de forma quantitativa o tempo e o esforço necessário para desenvolver um modelo BIM sem diretrizes com foco na avaliação simplificada da envoltória; e outro modelo BIM com foco na temática.

¹⁴ A afirmação é notória, uma vez que 100% dos dados necessários para a avaliação simplificada da envoltória estavam presentes em uma única tabela organizada e centralizada de dados.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Avaliação de Desempenho Energético em Projetos BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. v. 5. Brasília, DF: ABDI, 2017a.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Processo de Projeto BIM**: Coletânea Guias BIM ABDI-MDIC. v. 1. Brasília, DF: ABDI, 2017b.
- AKHANOVA, G.; NADEEM, A.; KIM, J. R.; AZHAR, S. A multi-criteria decision-making framework for building sustainability assessment in Kazakhstan. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, 2020.
- ALWAN, Z.; GLEDSON, B. Towards green building performance evaluation using asset information modelling. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 5, n. 3, p. 290-303, 2015.
- AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS. **AIA Document E202 – 2008, Building Information Modeling Protocol Exhibit**. Durham: AIA, 2008.
- ASHCRAFT, H. W. Building Information Modeling: A Framework for Collaboration. **Construction Lawyer**, v. 28, n. 3, 2008.
- ASL, M. R.; BERGIN, M.; MENTER, A.; YAN, W. BIM-based Parametric Building Energy Performance Multi-Objective Optimization. In: Proceedings of the 32nd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2014, Newcastle upon Tyne. **Proceedings [...]**. Newcastle upon Tyne: Northumbria University, 2014. p. 455-464.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- BARROS, N. K.; CARLO, J. C. Modelagem generativa integrada à eficiência energética: estudo da otimização da forma de edificações institucionais. **Arquitetura Revista**, v. 13, n. 2, 2017.
- BIM FORUM. **LEVEL OF DEVELOPMENT (ND) SPECIFICATION PART I & COMMENTARY For Building Information Models and Data**. 2019.
- BOLDRINI, L. C. **BIM e Design da experiência do usuário na otimização de uma ferramenta para avaliação simplificada da eficiência energética da envoltória de edificações residenciais**. 2020. 154 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.
- BRACHT, M. K. **Estudo de alternativas de projeto com foco em eficiência energética utilizando BIM**. 2016. 85 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

BRACHT, M.K., MELO, A.P.; LAMBERTS, R. A metamodel for building information modeling-building energy modeling integration in early design stage. **Automation in Construction**, vol. 121, p. 01-19, 2021.

BRASIL. Decreto nº 10.306, de 2 de abril de 2020. Estabelece a utilização do Building Information Modelling na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal, no âmbito da Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – Estratégia BIM BR, instituída pelo Decreto nº 9.983, de 22 de agosto de 2019. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2020.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Consulta Pública nº 3, de março de 2021. Proposta de aperfeiçoamento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2021a.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria Inmetro nº 42, de 24 de fevereiro de 2021. Aprova a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) que aperfeiçoa os Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C), especificando os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas quanto à sua eficiência energética. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2021b.

BRASIL. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Portaria Inmetro nº 50, de 01 de fevereiro de 2013. Aprova o aperfeiçoamento dos Requisitos de Avaliação da Conformidade para a Eficiência Energética de Edificações. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2013.

BRASIL. Instrução Normativa SLTI/MP nº 2, de 4 de junho de 2014. Dispõe sobre regras para a aquisição ou locação de máquinas e aparelhos consumidores de energia pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional, e uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nos projetos e respectivas edificações públicas federais novas ou que recebam retrofit. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2014.

BRASIL. Lei nº 14.133, de 1 de abril de 2021. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília: **Diário Oficial da União**. 2021.

CARLO, J. C. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envoltório de Edificações Não-residenciais**. 2008. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CARVALHO, J. P.; BRAGANÇA, L.; MATEUS, R. Guidelines for analysing the building energy efficiency using BIM. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 588, 2020.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas**. Florianópolis: UFSC, 2017.

CHANG, C. C.; SHI, W.; MEHTA, P.; DAUWELS, J. Life cycle energy assessment of university buildings in tropical climate. **Journal of Cleaner Production**, v. 239, 2019.

DRESCH, A.; LACERDA, D. P.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. **Design Science Research: A Method for Science and Technology Advancement**. 1. ed. New York: Springer International Publishing, 2014.

EADIE, R.; ODEYINKA, H.; BROWNE, M.; MCKEOWN, C.; YOHANIS, M. An analysis of the drivers for adopting building information modelling. **Journal of Information Technology in Construction**. v. 18, p. 338-352, 2013.

EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LEE, G. **BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors and Facility Managers**. 3. ed. New Jersey: Wiley, 2018.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras: No caminho da transição energética**. Rio de Janeiro: EPE, 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook 2017**. Washington: EIA, 2017. 151 p.

EUROPEAN COMMISSION. **European Construction Sector Observatory: Building Information Modeling in the EU construction sector**. Luxembourg: European Union, 2019.

FAROOQ, J.; SHARMA, P.; KUMAR, S. A BIM-based detailed electrical load estimation, costing and code checking. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 8, n. 5, p. 3484-3495, 2018.

FONSECA, R. W. **Iluminação natural e consumo energético de edificações não residenciais: aplicação de redes neurais artificiais**. 2015. 466 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

GASPAR, J. A. M.; RUSCHEL, R. A evolução do significado atribuído ao acrônimo BIM: Uma perspectiva no tempo. In: Congresso Internacional de la Sociedad Iberoamericana de Gráfica Digital, 21., 2017. **Anais [...]**. Concepción: Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía de la Universidad de Concepción, 2017.

GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. **GSA Building Information Modeling Series 01 - Overview**. Washington: GSA, 2007.

GERRISH, T.; RUIKAR, K.; COOK, M.; JOHNSON, M.; PHILLIP, M. Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 24, n. 2, p. 190-208, 2017.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; TOOKEY, J.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; NAISMITH, N.; AZHAR, S.; EFIMOVA, O.; RAAHEMIFAR, K. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 75, 2016.

GOMES, A. F. **Eficiência energética em edificações públicas do Poder Executivo Federal: oportunidades e desafios no contexto do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE – Edifica)**. 2017. 222 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

HARTER, H.; SINGH, M. M.; SCHNEIDER-MARIN, P.; LANG, W.; GEYER, P. Uncertainty Analysis of Life Cycle Energy Assessment in Early Stages of Design. **Energy and Buildings**, v. 208, 2020.

ISIKDAG, U.; UNDERWOOD, J. Two design patterns for facilitating Building Information Model-based synchronous collaboration. **Automation in Construction**, v. 19, n. 5, p. 544-553, 2010.

KIM, H.; ASL, M. R.; YAN, W. Parametric BIM-based Energy Simulation for Buildings with Complex Kinetic Façades. In: Proceedings of the 33rd International Conference on Education and research in Computer Aided Architectural Design in Europe, 2015, Vienna. **Proceedings** [...]. Vienna: Vienna University of Technology, 2015.

KRYGIEL, E.; NIES, B. **Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling**. 1. ed. Indianapolis: Wiley Publishing, 2008.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JUNIOR, J. A. V. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LAMBERTS, R.; CLETO, L. T. Certificação de Sistemas PBE Edifica. In: Seminário Programa Brasileiro de Etiquetagem em Eficiência Energética para Sistemas de Refrigeração e Ar-Condicionado, 2018, São Paulo. **Seminário** [...]. São Paulo: Federação das Indústrias do Estado de São Paulo.

LEITE, E. F. W.; HACKENBERG, A. M. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE ENVOLTÓRIA: COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO RTQ-C E INI-C ATRAVÉS DE ESTUDO DE CASO. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 9, n. especial, p. 532-552, 2020.

MANZIONE, L. **Proposição de uma Estrutura Conceitual de Gestão de Processo de Projeto Colaborativo com o uso BIM**. 2013. 343 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MELHADO, S.; PINTO, A. C. BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA UTILIZAÇÃO DO BIM PARA EXTRAÇÃO DE QUANTITATIVOS. In: Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção, 9., Encontro Latino Americano de Gestão e Economia da Construção, 6., 2015, São Carlos. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2015.

MELO, A. P. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 2012. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MELO, A. P.; VERSAGE, R. S.; SAWAYA, G.; LAMBERTS, R. A novel surrogate model to support building energy labelling system: A new approach to assess cooling energy demand in commercial Buildings. **Energy and Buildings**, v. 131, p. 233-247, 2016.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS.
ESTRATÉGIA BIM BR: Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling – BIM. Brasília: MDIC, 2018.

MONTIEL-SANTIAGO, F.J.; HERMOSO-ORZÁEZ, M.J.; TERRADOS-CEPEDA, J. Sustainability and Energy Efficiency: BIM 6D. Study of the BIM Methodology Applied to Hospital Buildings. Value of Interior Lighting and Daylight in Energy Simulation. **Sustainability**, v. 12, n. 14, 2020.

MYTAFIDES, C. K.; DIMOUDI, A.; ZORAS, S. Transformation of a university building into a zero energy building in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, v. 155, p. 98-114, 2017.

National Building Specification. **10th Annual BIM Report 2020**. New Castle Upon Tyne: NBS, 2020.

NATIVIDADE, L. R. **Comparativo de custos de obra**: método convencional e BIM. 2016. 81 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OHLWEILER, L. E.; SANTOS, M. M.; SILVA, A. C. S. B.; POUHEY, J. A.; FERREIRA, V. S. EXTRAÇÃO DE DADOS DE PROJETO EM BIM PARA ETIQUETAGEM DE EDIFÍCIOS. In: Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 11., Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15., 2019, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa: ANTAC, 2019.

OLIVEIRA, F. M. **Desenvolvimento de ferramenta BIM para avaliação prescritiva de eficiência energética integrada ao processo de projeto**. 2019. 301 f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.

OLIVEIRA, F. M.; BITTENCOURT, L. S.; DÓRIA, D. R. S. Uma ferramenta BIM para simulação de eficiência energética nas fases iniciais de projeto. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, 2020.

OLIVEIRA, F. M.; SANTOS, E. T. ASSEVERAÇÃO DE MODELOS BIM: CONCEITUAÇÃO E TERMINOLOGIA. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção, 2., 2019, Campinas. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2019.

OLIVEIRA, J. P. C. **Normalização BIM**: Especificação do Nível de Desenvolvimento e Modelação por Objetivos. 2016. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2016.

OLIVEIRA, O.; OLIVEIRA, P.; QUEIROZ, N.; NOME, C.; PEDRINI, A. PLATAFORMA BIM NA OTIMIZAÇÃO DA ETIQUETAGEM DA ENVOLTÓRIA POR MEIO DO MÉTODO PRESCRITIVO. In: Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 7., Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 11, 2011, Búzios. **Anais** [...]. Búzios: ANTAC, 2011.

OLIVEIRA, W. C. **Eficiência Energética em Edifícios Públicos no Sul do Brasil: Aplicação do Método do RTQ-C em Obras Licitadas pelas IFES**. 2018. 147 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

PARK, J.; PARK, J.; KIM, J.; KIM, J. Building information modelling based energy performance assessment system: An assessment of the Energy Performance Index in Korea. **Construction Innovation**, v. 12, n. 3, p. 335-354, 2012.

PATIÑO-CAMBEIRO, F.; BASTOS, G.; ARMESTO, J.; PATIÑO-BARBEITO, F. Multidisciplinary Energy Assessment of Tertiary Buildings: Automated Geomatic Inspection, Building Information Modeling Reconstruction and Building Performance Simulation. **Energies**, v. 10, n. 7, 2017.

PEZESHKI, Z.; SOLEIMANI, A.; DARABI, A. Application of BEM and using BIM database for BEM: A review. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 1-17, 2019.

POUEY, J. A.; MUTA, L. F.; LEITZKE, R. K.; SILVA, A. C. S. B. APLICAÇÃO DA PROPOSTA DA INI-C PARA AVALIAÇÃO DE PROJETO NZEB, PELO MÉTODO DE SIMULAÇÃO. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 18., 2020. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2020.

SARTORI, T.; CALMON, J. L. Analysis of the impacts of retrofit actions on the life cycle energy consumption of typical neighbourhood dwellings. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 158-172, 2019.

SERRA, E. G.; FILHO, Z. R. P. Methods for Assessing Energy Efficiency of Buildings. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, v. 7, n. 3, p. 432-443, 2019.

SILVA, T. F.; COELHO, K. M.; MELHADO, S. PROJETOS INDUSTRIAIS – BARREIRAS PARA A IMPLEMENTAÇÃO DA MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO. In: Encontro da Tecnologia de Informação e Comunicação na Construção, 7., 2015, Recife. **Anais** [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2015.

SOLIMAN JUNIOR, J.; BALDAUF, J.; FORMOSO, C. T.; TZORTZOPOULOS, P. Using BIM and Lean for Modelling Requirements in the Design of Healthcare Projects. In: 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, 2018. **Proceedings** [...]. Chennai: IGLC, 2018. p. 571-581.

STEHLING, M. P. **A utilização de modelagem da informação da construção em empresas de arquitetura e engenharia de Belo Horizonte**. 153 f. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, p. 357-375, 2009.

TAVARES, H. **Fora do padrão no Revit Architecture**: plugins e formas de uso para ganho de tempo e agilidade. São Paulo: Autodesk University, 2012.

TAVARES, H. **Práticas para classificação da envoltória pelo PROCEL Edifica no REVIT Architecture**. São Paulo: Autodesk University, 2011.

TEIXEIRA, A. C.; PELLANDA, P. C.; REIS, M. M.; JÚNIOR, G. M. Etiquetagem PROCEL para obras militares utilizando modelagem da informação da construção. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 4, p. 165-176, 2018.

TORREGROSA-JAIME, B.; GONZÁLEZ, B.; MARTÍNEZ, P. J.; PAYÁ-BALLESTER, G. Analysis of the Operation of an Aerothermal Heat Pump in a Residential Building Using Building Information Modelling. **Energies**, v. 11, n. 7, 2018.

TUSHAR, Q.; BHUIYAN, M.; SANDANAYAKE, M.; ZHANG, G. Optimizing the energy consumption in a residential building at different climate zones: Towards sustainable decision making. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 634-649, 2019.

VERSAGE, R. S. **METAMODELO PARA ESTIMAR A CARGA TÉRMICA DE EDIFICAÇÕES CONDICIONADAS ARTIFICIALMENTE**. 2015. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

WESTPHAL, F. S. **Análise de Incertezas e de Sensibilidade Aplicadas à Simulação de Desempenho Energético de Edificações Comerciais**. 2007. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

ZEMERO, B. R. **ANÁLISE DA APLICABILIDADE DA TECNOLOGIA BIM EM PROJETOS SUSTENTÁVEIS E ETIQUETAGEM DE EDIFICAÇÕES NO BRASIL**. 2016. 183 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

ZHOU, H.; AZAR, E. BIM-based energy consumption assessment of the on-site construction of building structural systems. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 9, n. 1, p. 2-14, 2019.