

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AMBIENTE CONSTRUÍDO**

Paula Rodrigues Barroso

Eficiência energética de edificações históricas:
Análise prática de HBIM e BEM em uma edificação histórica brasileira

Juiz de Fora
2025

Paula Rodrigues Barroso

Eficiência energética de edificações históricas:

Análise prática de HBIM e BEM em uma edificação histórica brasileira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Gestão do Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Martins Borges

Coorientador: Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barroso, Paula Rodrigues.

Eficiência energética de edificações históricas : análise prática de HBIM e BEM em uma edificação histórica brasileira / Paula Rodrigues Barroso. -- 2025.

169 f. : il.

Orientador: Marcos Martins Borges

Coorientador: Cristiano Gomes Casagrande

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído, 2025.

1. Patrimônio histórico. 2. Eficiência energética. 3. BIM. 4. HBIM. 5. BEM. I. Borges, Marcos Martins, orient. II. Casagrande, Cristiano Gomes, coorient. III. Título.

Paula Rodrigues Barroso

Eficiência energética de edificações históricas:

Análise prática de HBIM e BEM em uma edificação histórica brasileira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ambiente Construído. Área de concentração: Gestão do Ambiente Construído.

Aprovada em 27 de maio de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Martins Borges - Orientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Cristiano Gomes Casagrande – Coorientador
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr^a. Maria Ávila Branquinho
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. André Ribeiro de Oliveira
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 24/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Marcos Martins Borges, Professor(a)**, em 29/05/2025, às 17:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiano Gomes Casagrande, Professor(a)**, em 29/05/2025, às 19:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Avila Branquinho, Professor(a)**, em 29/05/2025, às 21:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Ribeiro de Oliveira, Usuário Externo**, em 24/06/2025, às 17:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Ufjf (www2.ufjf.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2362392** e o código CRC **3F7E5B6C**.

Dedico este trabalho com imenso carinho aos meus amados pais, Glaucia e Evaristo, à minha querida irmã, Gabriela, e ao meu companheiro de jornada, Breno, cujo apoio e amor são fontes inesgotáveis de inspiração e força.

AGRADECIMENTOS

A escrita desta dissertação foi uma construção que, indiretamente, envolveu a participação de muitas pessoas, em especial, destaco e agradeço àquelas que foram fundamentais não apenas para minha formação acadêmica, como também para o meu crescimento pessoal durante o percurso do mestrado.

Agradeço ao meu orientador professor Marcos Borges e ao meu coorientador professor Cristiano Casagrande, por compartilharem seus conhecimentos e por sempre me incentivarem na minha pesquisa.

À Professora Maria Branquinho, por gentilmente aceitar o convite para compor a minha banca de qualificação e a banca de defesa, dispondo seu tempo e conhecimento para enriquecer este trabalho com sua visão crítica e experiência. Ao Professor André Ribeiro, pelo aceite em integrar a banca de defesa, contribuindo com sua análise e valiosas considerações.

À Universidade Federal de Juiz de Fora pela acolhida e receptividade e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Ambiente Construído pelos ensinamentos, bem como ao João Paulo da secretaria do programa pela atenção e prestatividade em todas as fases do mestrado.

À Liziê, Nathane, Maysa, Clarisse, Olívia, Luiza e Jivago, que tive oportunidade de conhecer durante o período da pós-graduação e que tornaram a jornada mais leve e divertida.

À Universidade Federal de Minas Gerais, à Pró-reitoria de Administração e ao Departamento de Planejamento e Projetos da UFMG, em nome da diretora Renata Siqueira. A licença foi imprescindível para a realização do mestrado em outra cidade.

À professora Roberta Souza, do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética no Ambiente Construído da Escola de Arquitetura da UFMG, que me disponibilizou os relatórios referentes à etiquetagem da escola, objeto do meu estudo de caso.

Aos meus colegas de trabalho pelo apoio e suporte nesse período de dedicação ao mestrado, em especial ao Lucas Lima e a Daniela Nascimento, que sempre estiveram disponíveis para compartilhar dos seus conhecimentos.

Para finalizar, à minha família, sobretudo minha mãe, meu pai, minha irmã Gabriela, e meu marido Breno, por todo o amor, incentivo e por compreender minhas ausências.

RESUMO

A demanda mundial pela redução de emissão de CO₂ coloca em evidência a participação das edificações como um dos setores de maior consumo energético na atualidade. Nesse contexto, a adoção de processos e tecnologias relacionados ao *Building Information Modeling* (BIM) torna-se fundamental para assegurar a agilidade e eficiência, tanto na concepção do projeto quanto ao longo de todo o ciclo de vida das edificações. No entanto, a redução significativa das emissões de CO₂ só será alcançada se as edificações históricas forem incluídas nesse processo. Esta dissertação tem como objetivo investigar a viabilidade da utilização do *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) na análise energética de edificações históricas por meio da integração HBIM e *Building Energy Modeling* (BEM). Através de uma Revisão Sistemática de Literatura, foram identificadas as principais práticas, desafios e avanços nessa área, que posteriormente foram testados em um estudo de caso na Escola de Arquitetura da UFMG, um exemplar modernista da arquitetura brasileira que possui etiquetagem ENCE (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia). A pesquisa é empírica, de natureza aplicada, com abordagem tanto qualitativa quanto quantitativa, sendo classificada como exploratória em relação aos seus objetivos. As etapas práticas envolvem a modelagem HBIM no *software* Autodesk Revit e a simulação energética da envoltória a partir do modelo HBIM utilizando o EnergyPlus, considerando, inicialmente, a possibilidade de comparar os resultados obtidos com a etiquetagem de eficiência energética existente. Os desafios de interoperabilidade entre HBIM e BEM foram analisados, identificando limitações e possibilidades de aprimoramento na transferência de dados. Os resultados indicam que a modelagem HBIM pode fornecer um suporte valioso no que tange à identificação de pontos sensíveis para a preservação do patrimônio, entretanto, há desafios técnicos de interoperabilidade para realizar a análise energética a partir do HBIM. A pesquisa contribui para o avanço do conhecimento na aplicação de tecnologias digitais no retrofit energético de edificações patrimoniais, evidenciando potencialidades e desafios ainda existentes para intervenções mais assertivas e sustentáveis, conciliando preservação arquitetônica e eficiência energética.

PALAVRAS-CHAVE: Patrimônio histórico. Eficiência energética. BIM. HBIM. BEM.

ABSTRACT

The global demand for reducing CO₂ emissions highlights the role of buildings as one of the sectors with the highest energy consumption today. In this context, the adoption of processes and technologies related to Building Information Modeling (BIM) is essential to ensure agility and efficiency, both in project design and throughout the entire building lifecycle. However, a significant reduction in CO₂ emissions will only be achieved if historic buildings are included in this process. This dissertation aims to investigate the feasibility of using Heritage Building Information Modeling (HBIM) for the energy analysis of historic buildings through the integration of HBIM and Building Energy Modeling (BEM). Through a Systematic Literature Review, the main practices, challenges, and advancements in this field were identified and later tested in a case study at the School of Architecture of UFMG, a modernist example of Brazilian architecture that has ENCE certification (National Energy Conservation Label). The research is empirical, applied in nature, with both qualitative and quantitative approaches, and is classified as exploratory in terms of its objectives. The practical steps involve HBIM modeling in Autodesk Revit software and energy simulation of the envelope from the HBIM model using EnergyPlus, initially considering the possibility of comparing the results with the existing energy efficiency certification. The challenges of interoperability between HBIM and BEM were analyzed, identifying limitations and opportunities for improving data transfer. The results indicate that HBIM modeling can provide valuable support in identifying critical aspects for heritage preservation; however, technical interoperability challenges remain in conducting energy analysis directly from HBIM. This research contributes to advancing knowledge on the application of digital technologies in the energy retrofit of heritage buildings, highlighting both the potential and the existing challenges for more effective and sustainable interventions that reconcile architectural preservation with energy efficiency

KEYWORDS: Historic heritage. Energy efficiency. BIM. HBIM. BEM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação do tipo de pesquisa desenvolvida na dissertação.	22
Figura 2 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.	24
Figura 3 – Dimensões BIM.	32
Figura 4 – Método adaptado de seleção de artigos – Proknow – C.	42
Figura 5 – Aplicação dos filtros – ProKnow – C.	48
Figura 6 – Vista superior da Escola de Arquitetura da UFMG.	72
Figura 7 – Volumetria dos blocos da Escola de Arquitetura da UFMG.	73
Figura 8 – Estrutura do 2º pavimento (frente) do <i>hall</i> principal.	74
Figura 9 – Estrutura do <i>hall</i> principal – detalhe da escada em caracol.	74
Figura 10 – Estrutura do <i>hall</i> principal – detalhe do Prédio do Mercadinho ainda não demolido.	74
Figura 11 – Bloco L sendo construído e o Prédio do Mercadinho na esquina.	75
Figura 12 – Edifício da EA na época de sua inauguração, em 1954, já com o Mercadinho demolido.	75
Figura 13 – EA em 2008 (ângulo 1).	75
Figura 14 – EA em 2008 (ângulo 2).	75
Figura 15 – EA em outubro de 2024 (ângulo 1).	76
Figura 16 – EA em outubro de 2024 (ângulo 2).	76
Figura 17 – Fachada envidraçada no <i>hall</i>	76
Figura 18 – Escadaria e painel ao fundo.	76
Figura 19 – Detalhe das esquadrias metálicas e dos <i>brises</i> da fachada.	77
Figura 20 – Fachada voltada para praça.	78
Figura 21 – Fachada da Rua Paraíba.	79
Figura 22 – Símbolo metálico.	79
Figura 23 – Blocos setorizados conforme as exigências de preservação.	80
Figura 24 – Plantas do projeto original do Bloco L.	81
Figura 25 – Representação esquemática das fachadas do Bloco L.	83
Figura 26 – Fachada F1.	84
Figura 27 – Esquadrias do auditório vistas do interior.	84
Figura 28 – Fachada F2 em vermelho.	85
Figura 29 – Fachada F3.	86
Figura 30 – Esquadrias com vidro fixo, básculas superiores e <i>brises</i> internos.	87
Figura 31 – Comando das básculas à altura de 1,80 m.	87
Figura 32 – Fachada F4.	87
Figura 33 – Fachada F5.	88
Figura 34 – Fachada F6.	89
Figura 35 – Volumetria da cabine de projeção do auditório.	89
Figura 36 – Volumetria da cabine vista de dentro da edificação.	89
Figura 37 – Planta setorizada do primeiro pavimento.	90
Figura 38 – Planta setorizada do segundo pavimento.	91
Figura 39 – Planta setorizada do terceiro pavimento.	92
Figura 40 – Taco de madeira em bom estado de conservação.	93
Figura 41 – Taco de madeira precisando de manutenção.	93
Figura 42 – Destaque para o piso do <i>hall</i>	93
Figura 43 – Destaque para o piso da escada.	93
Figura 44 – Piso do <i>hall</i> secundário em pedra serrada de mármore branco.	94
Figura 45 – Piso do primeiro e segundo lance da escada em mármore branco.	94

Figura 46 – Escada e <i>hall</i> de marmorite.....	94
Figura 47 – Piso de marmorite dos corredores.	94
Figura 48 – Piso de copa e banheiros.....	95
Figura 49 – Paredes de copa e banheiros.	95
Figura 50 – Infiltração.....	96
Figura 51 – Infiltração e sujidade.	96
Figura 52– Divisória naval amadeirada.	96
Figura 53 – Divisórias navais simples.	96
Figura 54 – Plateia do auditório.....	97
Figura 55 – Palco do auditório.....	97
Figura 56 – Parede de mármore.	98
Figura 57 – Parede de tijolo de vidro.....	98
Figura 58 – Detalhe das paredes em mármore do mezanino.....	98
Figura 59 – Treliça de madeira.....	98
Figura 60 – Detalhe do balcão no <i>hall</i> principal.....	99
Figura 61 – Esquadria de uma sala.....	100
Figura 62 – Esquadrias de um banheiro.	100
Figura 63 – Esquadrias de um corredor.	100
Figura 64 – Esquadrias vistas pelo lado externo da edificação.....	100
Figura 65 – Esquadrias da sala para o corredor.	101
Figura 66 – ENCE de Edificação Construída da EA-UFMG.....	102
Figura 67 – Modelo 3D EA-UFMG.	103
Figura 68 – Divisão das fachadas do Bloco L.	107
Figura 69 – Dados inseridos no WebPrescritivo.....	111
Figura 70 – Janela de configuração e terreno no Revit.....	113
Figura 71 – Tipos de modelagem no Revit.....	114
Figura 72 – Configuração de tipo de construção e exportação por ambientes.	114
Figura 73 – Parede básica, composta e cebola no Revit.	115
Figura 74 – Configurações das camadas de composição da parede.....	116
Figura 75 – Parâmetros de energia do projeto.	117
Figura 76 – Configurações de parâmetros de tipo de uma parede externa.	118
Figura 77 – Configurações de parâmetros de tipo de uma janela.	118
Figura 78 – Configurações de parâmetros no navegador de materiais.....	119
Figura 79 – Preenchimento da absorção e cálculo automático da transmitância térmica.	119
Figura 80 – Parâmetro de projeto “Bom estado de conservação”.....	120
Figura 81 – Propriedades do parâmetro de projeto “Bom estado de conservação”.	121
Figura 82 – Desalinhamento de paredes.	122
Figura 83 – Inconsistência estrutural.....	122
Figura 84 – Descontinuidade da fachada.....	122
Figura 85 – Parte do <i>brise</i> do auditório modelado com parede cortina.	122
Figura 86 – Parte do <i>brise</i> do auditório modelado com parede básica.	123
Figura 87 – Parte do <i>brise</i> modelado com parede cortina.....	123
Figura 88 – Parte do <i>brise</i> modelado por agrupamento de elementos.....	124
Figura 89 – Marquise inclinada modelada com elemento piso.....	124
Figura 90 – Modelo BIM EA-UFMG – Perspectiva externa.	125
Figura 91 – Modelo BIM EA-UFMG – Perspectiva <i>hall</i> principal.	125
Figura 92 – Janela de exportação de arquivos do Revit.	126
Figura 93 – Escolha por usar elementos de ambientes/espacos.	127

Figura 94 – Resultado do arquivo de energia gbXML no visualizador.	128
Figura 95 – Falhas no modelo geométrico da EA.	129
Figura 96 – Verificação de vértices não estanques.	129
Figura 97 – Verificação de espaços não estanques.	129
Figura 98 – Cores das superfícies configuradas no visualizador gbXML.org.	130
Figura 99 – Cálculo de área dos pavimentos.	130
Figura 100 – Fluxo de trabalho de interoperabilidade.	131
Figura 101 – Erros de superfície com espaços adjacentes.	132
Figura 102 – Ignorando superfície porque não é um prisma.	133
Figura 103 – Erro relacionado à divisão de superfície base.	134
Figura 104 – Erro relacionado a superfícies subdivididas e objetos duplicados.	134
Figura 105 – Erro de geometrias desconsideradas na exportação.	135
Figura 106 – Erro na exportação de <i>brises</i>	136

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estratégia de Busca (Investigação Preliminar).....	38
Quadro 2 – Artigos de RSL para verificação de similaridade.	39
Quadro 3 – Resumo da busca de artigos.	44
Quadro 4 – Artigos reconhecidos do portfólio bibliográfico.	46
Quadro 5 – Artigos recentes do portfólio bibliográfico.	47
Quadro 6 – Resumo das intervenções práticas dos artigos relevantes.....	62
Quadro 7 – Resumo de relatos de dificuldades e soluções adotadas.....	67
Quadro 8 – Dados da envoltória da Escola de Arquitetura UFMG.	104

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Países das instituições de pesquisa dos autores do Portifólio Bibliográfico.....	49
Gráfico 2 – Número de citações dos trabalhos dos autores que compõem o Banco de Autores.....	50
Gráfico 3 – Participação de cada país presente no Banco de Autores.	51
Gráfico 4 – Ocorrência de palavras-chave.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados de absorvância solar de materiais da envoltória do Bloco L.	105
Tabela 2 – Variáveis utilizadas no cálculo da eficiência da envoltória do Bloco L...	106
Tabela 3 – Pré requisitos de coeficiente de transferência térmica e coeficiente de absorção térmica da cobertura.....	107
Tabela 4 – Dados dimensionais da edificação.	108
Tabela 5 – Parâmetros Térmicos das Fachadas – Absorção e Transmissão de Calor.	108
Tabela 6 – Volume dos pavimentos	109
Tabela 7 – Dados das aberturas.	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIA	<i>American Institute of Architects</i>
AVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
BEM	<i>Building Energy Modeling</i>
BIM	<i>Building Information Modeling</i>
BPS	<i>Building Performance Simulation</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CEP	Consumo energético da edificação
CERTI	Centro de Referência em Tecnologias Inovadoras
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CIT	Centro de Informações Técnicas
COP21	Conferência das Partes 21
DPP	Departamento de Planejamentos e Projetos
EA-UFMG	Escola de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Minas Gerais
EN	Norma europeia
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
EPW	<i>EnergyPlus Weather File</i>
EUROSTAT	Gabinete de Estatísticas da União Europeia
GBC HB	<i>Green Building Council Historic Building</i>
gbXML	<i>Green Building XML</i>
GIS	<i>Geographic Information System</i>
HBIM	<i>Heritage Building Information Modeling</i>
IDF	<i>Input Data File</i>
IFC	<i>Industry Foundation Classes</i>
INI-C	Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IS	Instalações Sanitárias
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABCON	Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética em Edificações
LAGEAR	Laboratório Gráfico para Experimentação Arquitetônica
LEED	<i>Leadership in Energy and Environmental Design</i>
LoD	<i>Level of Detail</i>
LOD	<i>Level of Development</i>
LOI	<i>Level of Information</i>
MEP	<i>Mechanical, Electrical, Plumbing</i>
MOM	Morar de Outras Maneiras
NAG	Núcleo de Apoio à Graduação
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NPGAU	Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
NT07	Nota técnica 07
OIA	Organismo de Inspeção Acreditado
PACPS	Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PRA	Pró- Reitoria de Administração
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i>
PRJ	Departamento de Projetos
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PROKNOW-C	<i>Knowledge Development Process – Constructivist</i>
RSL	Revisão Sistemática de Literatura
RTQ-C	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas
TI	Tecnologia da Informação
UFMG	Universidade Federal de Minas Gerais
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
3D	Três dimensões
6D	Seis dimensões
7D	Sete dimensões

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	21
1.2 METODOLOGIA	21
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	26
2.1 PATRIMÔNIO HISTÓRICO	26
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EDIFICAÇÕES	28
2.3 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)	31
2.3.1 Dimensões BIM	32
2.3.2 Nível de desenvolvimento	33
2.3.3 Interoperabilidade	34
2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	36
3 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	37
3.1 INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR	37
3.2 SELEÇÃO DOS ARTIGOS PARA O PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO	40
3.2.1 Data da pesquisa	40
3.2.2 Processo metodológico de seleção dos artigos	41
3.2.3 Bases de dados	42
3.2.4 Palavras-chave, operadores booleanos e filtros	42
3.2.5 Resultado das buscas	43
3.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA	48
3.4 ANÁLISE DOS ARTIGOS.....	52
3.4.1 Relato sobre o uso de <i>softwares</i>	63
3.4.2 Desafios e soluções relatados pelos autores para análise da eficiência energética em HBIM	65
3.4.3 Considerações finais sobre a RSL	68
4 ESTUDO DE CASO – ESCOLA DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UFMG71	
4.1 DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BLOCO L	82
4.1.1 Fachadas	83
4.1.2 Piso externo	90
4.1.3 Características do interior do edifício	90
4.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ENVOLTÓRIA.....	101
4.3 PROTÓTIPO VIRTUAL DA EDIFICAÇÃO – HBIM/BEM	111
4.3.1 Processo de modelagem no Autodesk Revit	112
4.3.2 Análise energética do modelo HBIM – Processos e obstáculos	126
4.3.3 Decisão de interromper a simulação	136

5 RESULTADOS	138
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	141
6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	143
REFERÊNCIAS	146
APÊNDICE A – Quadro resumo de softwares utilizados pelos autores	158
APÊNDICE B – Plantas e elevações do Bloco L.....	160

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial pela redução de emissão de gás carbônico (CO₂) foi amplamente discutida na 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC¹), onde os 195 países membros aprovaram o Acordo de Paris. Nesse acordo ficou definido o compromisso desses países em diminuir a emissão de gases de efeito estufa (UNFCCC, 2015). Entretanto, o Relatório sobre a Lacuna de Emissões 2023, documento lançado anualmente antes das negociações climáticas anuais, indicou que as emissões de gases de efeito estufa atingiram um recorde histórico em 2023 (*United Nations Environment Programme - UNEP, 2023*). Com isso, percebe-se que os esforços aplicados não foram suficientes e o aumento da temperatura global está muito acima das metas estipuladas no Acordo de Paris.

O setor de edificações desempenha um papel crucial na redução dos gastos energéticos. Segundo o Relatório de Status Global para Edificações e Construções (*United Nations Environment Programme, 2024*), é necessário que, até 2030, o setor diminua sua intensidade energética em 37% em relação aos níveis de 2015. Apesar de uma pequena redução em 2022, os índices permaneceram 15% acima da meta estipulada. De acordo com o *World Green Building Council (2019)*, as edificações possuem o maior e mais rentável potencial de mitigação de emissões de gases de efeito estufa. Cerca de 39% das emissões globais de CO₂ são provenientes dos edifícios, sendo 28% relacionados à operação, energia de aquecimento e arrefecimento, enquanto os 11% restantes são provenientes de materiais de construção (*World Green Building Council, 2019*).

Nesse sentido, coloca-se em evidência a necessidade de ampliar esforços para mitigar os danos causados pelo setor do ambiente construído. Dentre as prioridades citadas no Relatório de Status Global para Edificações e Construções está a necessidade de aumentar a taxa e o impacto da adaptação de edifícios existentes para eficiência energética, dos atuais 1% para 5-10% ao ano (*United Nations Environment Programme, 2024*).

¹ UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) – em português, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas.

Na União Europeia, cerca de 75% do parque imobiliário é considerado energeticamente ineficiente (*European Commission, 2018*), tendo um terço dos edifícios mais de 50 anos (*EUROSTAT, 2013*). Esses dados demonstram que os edifícios históricos são, em sua maioria, ineficientes em termos energéticos, tendo altos custos com o consumo de energia e, conseqüentemente, emitindo grande quantidade de CO₂. Além disso, muitas vezes essas edificações são subutilizadas devido às condições de conforto interno serem insatisfatórias (*Gremmelspacher et al., 2021*).

Esses desafios enfrentados na União Europeia podem ser indicativos de uma tendência global, especialmente em regiões onde há uma quantidade significativa de edifícios históricos sem ter regulamentações em termos de eficiência energética. Portanto, é crucial que estratégias de melhoria e renovação de edifícios sejam consideradas não apenas na União Europeia, mas em todo o mundo, para enfrentar os desafios globais relacionados à descarbonização.

O retrofit energético é uma possibilidade para aumentar o ciclo de vida de uma edificação e diminuir a necessidade de novas construções, conseqüentemente, poupando a emissão de CO₂ incorporado ao processo de obra. Diante da necessidade de adequação às demandas contemporâneas, que buscam integrar conforto ambiental e eficiência energética, surgem desafios de propor estratégias de intervenção que respeitem os valores de preservação patrimonial e a integridade histórica do bem (*Japiassú, 2019; Gremmelspacher, et al., 2021*).

No contexto das edificações históricas ou tombadas, as intervenções arquitetônicas seguem princípios específicos. *Japiassú (2019)* destaca a importância da distinguibilidade, mínima intervenção, reversibilidade e compatibilidade de técnicas e materiais. A autora reitera a necessidade de utilizar estratégias de retrofit que harmonizem atributos de preservação cultural, desempenho energético e conforto térmico, adaptando a proposta ao contexto edificado. Segundo ela, a fase inicial do processo de projeto, que envolve o levantamento e caracterização da edificação, é fundamental para embasar a escolha da estratégia de intervenção destinada a aprimorar o desempenho térmico e energético do edifício. No entanto, a ausência de informações técnicas sobre os componentes construtivos e impossibilidade de ensaios destrutivos para investigação, dificultam a caracterização da edificação.

Milone et al. (2015), que desenvolveram uma pesquisa analisando o uso de tecnologias viáveis para intervenções em edifícios históricos, constataram que as

tecnologias reconhecidas pelo elevado desempenho térmico frequentemente revelam uma incompatibilidade com a integridade arquitetônica da construção por alterarem significativamente as características protegidas da edificação. Caso não seja possível a utilização da tecnologia mais eficaz para a economia de energia, deve-se considerar a economia de energia possível com o uso de tecnologias compatíveis com o patrimônio histórico que, embora não ofereçam os melhores desempenhos energéticos, são consistentes com a conservação histórica e arquitetônica do edifício. A avaliação da compatibilidade de um elemento novo com um edifício histórico é um tópico amplamente discutido no âmbito da preservação arquitetônica (Milone *et al.*, 2015).

No cenário internacional, profissionais da construção civil têm promovido iniciativas para estimular a adoção de práticas sustentáveis em edificações já existentes. Como resultado, foram desenvolvidos diversos métodos para avaliar, classificar e certificar empreendimentos que incorporam essas práticas. Entre esses métodos, os sistemas de certificação de eficiência energética se destacam como ferramentas eficazes para a redução do consumo de energia elétrica e das emissões de CO₂ (Garcia, 2017). No Brasil, a eficiência energética de edificações residenciais, comerciais, públicas e de serviços é avaliada com base em critérios estabelecidos pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica), que busca fomentar um mercado mais exigente e consciente quanto ao desempenho energético das construções.

A simulação computacional é utilizada para avaliação dos níveis de eficiência energética em edificações, e muitas vezes se mostra necessária para garantir o cumprimento de normas e obtenção de etiquetas ou selos ambientais. No Brasil, este processo é indicado como um dos métodos para obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE), conforme o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) (BRASIL, 2010), podendo ser utilizado de forma individual ou de forma complementar ao método prescritivo; além de ser indicado pela norma brasileira NBR15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho (ABNT, 2024); e pelas certificações AQUA (Alta Qualidade Ambiental) e LEED (*Leadership in Energy & Environmental Design*) (Garcia, 2017).

A busca pela eficiência energética em edificações históricas apresenta diversos desafios, sendo este um tema relevante para a comunidade científica e profissional

que atua na área de conservação patrimonial. Para enfrentar de maneira abrangente e precisa as complexidades inerentes ao retrofit energético, torna-se imperativo adotar abordagens inovadoras que aproveitem os avanços tecnológicos disponíveis. É nesse contexto que o *Building Information Modeling* (BIM) pode facilitar o processo, não apenas viabilizando a representação digital precisa de estruturas históricas, mas também potencializando a avaliação e o aprimoramento da eficiência energética dessas edificações.

Desde a sua origem, o BIM tem sido empregado com o propósito de otimizar as etapas de concepção e gestão de novas edificações (Sacks *et al.*, 2021). Os ganhos proporcionados pelo BIM no âmbito de novos projetos são reconhecidos entre os profissionais das áreas de Arquitetura e Engenharias. No entanto, subsistia uma significativa demanda por uma abordagem análoga que direcionasse sua aplicação para a gestão e o desenvolvimento de projetos de retrofit e requalificação voltados às edificações históricas.

O *Heritage Building Information Modeling* (HBIM) surge para sanar essa demanda, atendendo à necessidade de conservação de estruturas patrimoniais. Segundo Tolentino (2018), HBIM nada mais é que a extensão do conceito BIM para as edificações históricas e objetiva a documentação, a análise e a conservação dessas edificações.

Segundo Dore e Murphy (2012), o HBIM é um processo que utiliza uma abordagem de engenharia reversa para recriar digitalmente edificações históricas. Inicialmente, elementos arquitetônicos são identificados por meio de técnicas como varredura a *laser* ou fotogrametria, e os dados obtidos são integrados a elementos paramétricos, resultando na criação de um modelo digital. Esse procedimento não parte de projetos ou modelos preexistentes, mas se baseia em tecnologias de levantamento que capturam as características físicas e geométricas da construção. Assim, gera-se um modelo geométrico abrangente que incorpora informações detalhadas, como materiais e processos construtivos. Quando projetos originais estão disponíveis, essas tecnologias podem ser integradas às informações existentes, enriquecendo o modelo digital. Contudo, mesmo na ausência de registros históricos, as técnicas avançadas de levantamento permitem criar modelos precisos e confiáveis, garantindo tanto a preservação quanto o entendimento do valor histórico e arquitetônico da edificação.

A criação de modelos digitais apresenta uma complexidade única quando se trata de conservar edifícios históricos. Isso envolve considerar diversos elementos, como a evolução ao longo do tempo, os métodos e sistemas construtivos utilizados, a composição dos materiais empregados, as técnicas artesanais utilizadas e a vasta gama de particularidades ligadas a aspectos sociais, culturais e regionais. Esses são considerados dados de natureza não geométrica que precisam ser representados no modelo. Portanto, o modelo geométrico gerado é enriquecido com dados de natureza não geométrica (Moura e Costa, 2020).

O BIM vai além de uma ferramenta de modelagem tridimensional de edifícios, pois também é capaz de monitorar, gerir e manipular informações diversas, com vistas a ter impacto no conforto do utilizador final, na gestão da edificação e até mesmo no desenvolvimento urbano. Alinhando tecnologia e processos, o BIM propicia a criação de representações digitais precisas e ricas em informações, não apenas da geometria das edificações, mas também de dados relevantes que permeiam todo o ciclo de vida de um empreendimento (Isayeva, 2018).

O desenvolvimento de edifícios que sejam eficientes em termos energéticos é um processo complexo que demanda a colaboração de vários especialistas, cada um com suas próprias habilidades e perspectivas. Para edifícios novos, já concebidos desde a fase inicial do projeto em BIM, são estabelecidos uma série de parâmetros construtivos que frequentemente abarcam objetivos multidisciplinares que podem ser divergentes e essas decisões tomadas nesse estágio possuem uma influência preponderante no desempenho subsequente do edifício. Uma variedade considerável de fatores, desde o clima local onde o edifício está situado até as propriedades térmicas dos materiais de construção adotados, influenciam diretamente o comportamento térmico da construção.

A modelagem energética denominada *Building Energy Modeling* – BEM é a análise do desempenho energético do edifício por meio da simulação que utiliza critérios pré-estabelecidos descrevendo a composição e utilização do edifício (Gerrish *et al.*, 2017).

Para Kamel e Memari (2019), o BIM desempenha um papel significativo na modelagem, simulação e gestão de dados energéticos, principalmente por sua habilidade em simplificar a manipulação de informações. Isso pode resultar na automatização da modelagem energética, na melhoria da visualização dos resultados, na capacidade de armazenar e estruturar novos dados de construção e, de maneira

especial, na incorporação de informações em tempo real para manter um modelo de energia atualizado.

Para novas edificações, a modelagem energética permite antecipar a utilização e o padrão de comportamento do edifício, efetuar estimativas e comparações do desempenho entre diferentes propostas de projeto, além de identificar possíveis modificações que contribuam para a redução do consumo energético (Betim, 2022). Como apontado por Azevedo e Tavares (2020), é mais efetivo empreender a análise energética desde a etapa inicial do planejamento de um projeto, uma vez que essa fase apresenta maior flexibilidade, possibilitando a realização de múltiplas alterações e a obtenção de economias energéticas substanciais. Contudo, busca-se nessa pesquisa, entender as possibilidades da aplicação do BIM e do BEM em edificações já consolidadas e com peculiaridades inerentes ao valor histórico.

Aprimorar a eficiência energética de edifícios já construídos é um processo desafiador, devido às propriedades físicas praticamente imutáveis. O uso do BIM para avaliar o desempenho energético desses edifícios permite, por meio de simulações, contrastar o desempenho atual com o projetado para uma renovação, possibilitando identificar as opções de intervenção mais eficazes (Pereira *et al.*, 2021).

O diferencial do BIM reside na qualidade e na quantidade de dados que podem ser inseridos no modelo de engenharia reversa, o que permite simulações mais condizentes com a realidade. Esta abordagem metódica contribui para intervenções mais assertivas na edificação, reduzindo potencialmente danos ao patrimônio histórico. Além disso, o BIM possibilita uma gestão energética pós-retrofit mais eficaz, facilitando a atualização do sistema energético instalado e permitindo a reanálise das demandas a qualquer momento. Esta capacidade de gestão contínua contribui para a manutenção da eficiência energética ao longo do tempo, proporcionando benefícios duradouros para as edificações históricas.

Nesse contexto, este trabalho busca contribuir na área de eficiência energética de edificações históricas, investigando e compreendendo as potenciais aplicações do HBIM e do BEM para proporcionar soluções integradas e sustentáveis no desafio de harmonizar a preservação do patrimônio histórico com as demandas urgentes de eficiência energética.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral desta dissertação é investigar a viabilidade da utilização do HBIM na análise energética de edificações históricas por meio da integração HBIM e BEM.

Para que o objetivo geral seja alcançado, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i. Identificar as principais práticas, desafios e avanços na integração de HBIM e BEM, com foco na análise energética de edificações históricas;
- ii. Aplicar as principais práticas identificadas em um estudo de caso de uma edificação modernista brasileira que já possui etiqueta de eficiência energética, fazendo um recorte para a análise da envoltória;
- iii. Avaliar se a metodologia baseada na simulação computacional a partir de um modelo HBIM pode reproduzir os resultados obtidos pelo método prescritivo de etiquetagem, conforme indicado pelo RTQ-C (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas).

1.2 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos, foi desenvolvida uma análise abrangente da literatura científica sobre o tema por meio de uma Revisão Sistemática de Literatura. Essa etapa visa identificar as melhores práticas, os *softwares* mais utilizados, os desafios recorrentes e as potencialidades destacadas por outros autores. Com base nos achados da literatura, busca-se aplicá-los a uma edificação histórica brasileira que já foi etiquetada pelo sistema de etiquetagem e avaliação energética (PBE Edifica). O estudo de caso será desenvolvido no bloco referente ao projeto original da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, um edifício modernista que já possui a certificação do PBE Edifica.

O estudo de caso concentra-se exclusivamente na análise energética da envoltória da edificação, pois a envoltória representa um dos principais fatores que influenciam o desempenho térmico e a eficiência energética de um edifício. A troca de calor entre os ambientes interno e externo ocorre majoritariamente por meio da envoltória, sendo determinante para a demanda energética de climatização (Sirtuli,

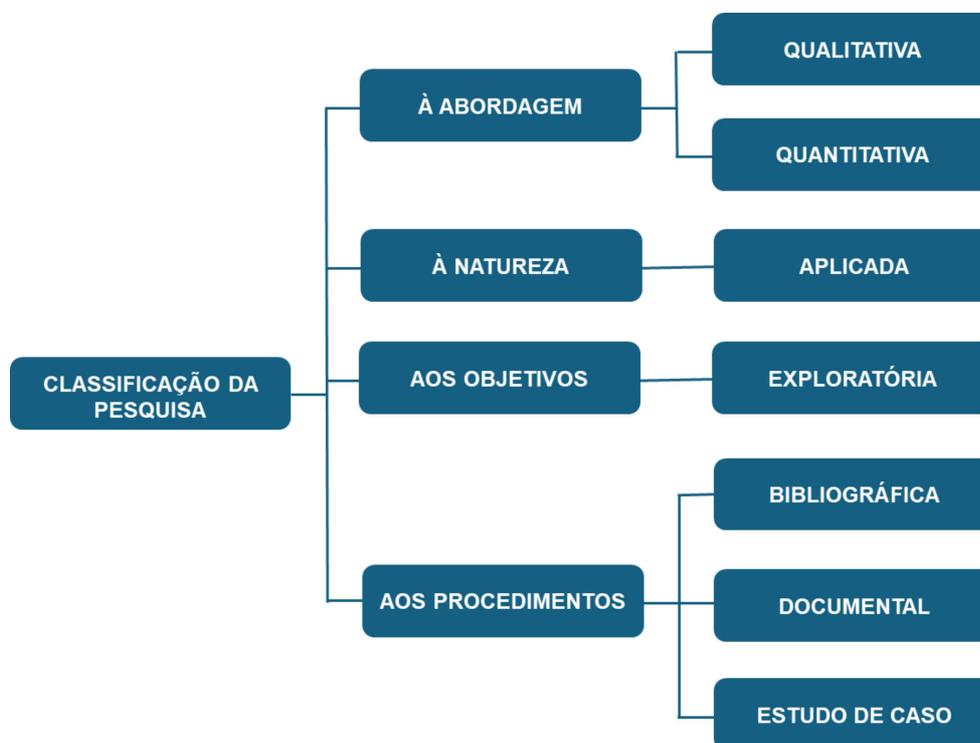
Dias e Rodrigues, 2022). Além disso, a envoltória é a parte mais complexa na modelagem da Escola de Arquitetura, o que pode gerar desafios específicos de interoperabilidade entre HBIM e BEM, tornando essa investigação particularmente relevante para a avaliação da aplicabilidade dessas ferramentas na análise energética de edificações históricas.

A edificação foi etiquetada pelo método prescritivo, conforme indicado pelo RTQ-C (BRASIL, 2010), recebendo nota C para a envoltória. Assim, o estudo busca avaliar se a metodologia baseada na simulação computacional a partir de um modelo HBIM pode reproduzir os resultados obtidos pelo método prescritivo, conforme indicado pelo RTQ-C (BRASIL, 2010).

Para isso, o modelo HBIM será exportado em formatos compatíveis com o Energy Plus, permitindo a simulação computacional da envoltória. O objetivo é verificar a viabilidade desse processo e, comparar os resultados obtidos com a etiqueta ENCE existente.

A pesquisa pode ser classificada quanto à abordagem, à natureza, aos objetivos e aos procedimentos (Silveira e Córdoba, 2009) como mostra a Figura 1.

Figura 1 – Classificação do tipo de pesquisa desenvolvida na dissertação.



Fonte: Adaptado de Silveira e Córdoba, 2009.

Quanto à forma de abordagem a pesquisa é tanto qualitativa quanto quantitativa. Qualitativa porque aprofunda-se na compreensão da utilização do BIM para a eficiência energética de edificações históricas a partir de dados não métricos, como os valores culturais intangíveis de preservação patrimonial, por exemplo. E, quantitativa pois utiliza-se de comparações métricas de consumo energético, de medições de propriedades térmicas, entre outros.

Quanto à natureza, esta pesquisa caracteriza-se por ser aplicada, pois objetiva-se gerar conhecimentos que devem ser empregados nos projetos de retrofit energético de edificações históricas, dirigidos a uma busca geral na diminuição do consumo energético das edificações e, conseqüentemente, auxiliando na redução da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

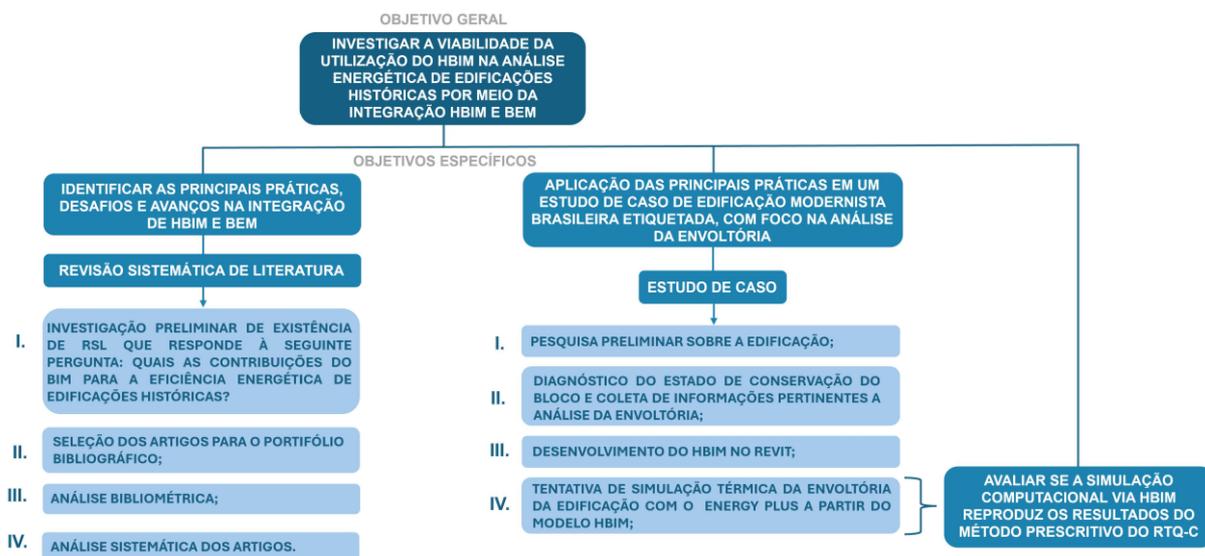
Quanto aos objetivos, a pesquisa é exploratória, pois, através da pesquisa bibliográfica e documental e das análises efetuadas no estudo de caso, busca-se compreender como o BIM pode auxiliar na eficiência energética de edificações históricas.

Por fim, quanto aos procedimentos metodológicos, a pesquisa caracteriza-se por ser:

- Bibliográfica, devido à fundamentação teórica e a revisão sistemática de literatura;
- Documental, pois se propõe a analisar documentos relacionados à edificação do estudo e caso;
- Estudo de caso, pois propõe investigar e caracterizar uma edificação histórica brasileira, quanto ao uso do HBIM e BEM para a análise da eficiência energética de sua envoltória.

Para se alcançar os objetivos da pesquisa foram realizados os procedimentos metodológicos apresentados na Figura 2.

Figura 2 – Procedimentos metodológicos da pesquisa.



Fonte: A autora.

A Revisão Sistemática de Literatura foi desenvolvida utilizando o Método Proknow-C, que é detalhadamente descrito na seção 3.2.2. Para o Estudo de Caso, é empregado o *software* Autodesk Revit para a modelagem HBIM, amplamente reconhecido na literatura como uma das ferramentas mais utilizadas para esse tipo de aplicação. Para a análise energética, utiliza-se o EnergyPlus, recomendado em diversos estudos relacionados. Durante todo o processo, as dificuldades encontradas serão registradas e analisadas.

O processo do estudo de caso será dividido em quatro etapas principais:

- i. Pesquisa preliminar sobre a edificação;
- ii. Diagnóstico do estado de conservação do bloco e coleta de informações pertinentes à análise da envoltória;
- iii. Desenvolvimento de um modelo HBIM da edificação no *software* Revit (versão 2025), com foco em informações pertinentes à análise da envoltória, documentando os desafios relacionados à modelagem;
- iv. Simulação térmica da envoltória da edificação utilizando o Energy Plus (versão 23.2) a partir do modelo HBIM produzido no Revit.

Em todo o processo de modelagem e simulação, foi avaliada a adequabilidade da integração entre HBIM e BEM para a análise da eficiência energética da envoltória de edificações históricas.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado em **seis capítulos**. O **Capítulo 1**, intitulado Introdução, apresenta o tema proposto, contextualizando-o. Nele, são definidos o escopo do estudo, os objetivos e a metodologia adotada.

O **Capítulo 2** apresenta a fundamentação teórica, abordando os principais conceitos que sustentam este trabalho. São discutidos temas relacionados ao patrimônio histórico; à eficiência energética das edificações, destacando a análise da envoltória; e ao BIM.

O **Capítulo 3** apresenta a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) focada em identificar as principais práticas, desafios e avanços na integração de HBIM e BEM.

O **Capítulo 4** descreve o Estudo de Caso da Escola de Arquitetura da UFMG, onde foram realizadas a modelagem HBIM e a simulação térmica da envoltória da edificação.

No **Capítulo 5**, são apresentados os resultados obtidos.

Por fim, o **Capítulo 6** apresenta as considerações finais deste trabalho, estabelecendo a relação entre o objetivo geral inicialmente proposto e os resultados obtidos, além de oferecer recomendações para pesquisas futuras.

Ao final, são incluídas as **Referências** utilizadas na pesquisa e os **Apêndices**.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A preservação do patrimônio histórico é um desafio multidisciplinar que busca garantir a conservação de seus valores históricos e culturais, ao mesmo tempo em que se adequa às demandas contemporâneas de uso e desempenho. Nesse contexto, a eficiência energética destaca-se como uma prioridade, devido à necessidade de avaliar e otimizar o comportamento térmico das edificações históricas, com especial atenção à envoltória, elemento principal responsável pelas trocas de energia entre o ambiente interno e externo.

O uso do BIM, em suas variantes HBIM e BEM, configura-se como uma metodologia estratégica nesse processo, ao viabilizar a modelagem detalhada, a simulação energética e a integração de dados, contribuindo para intervenções mais eficientes e embasadas.

Este capítulo apresenta os fundamentos conceituais que sustentam a estrutura teórica da pesquisa, proporcionando o embasamento necessário para a compreensão das etapas seguintes do estudo.

2.1 PATRIMÔNIO HISTÓRICO

De acordo com Ghirardello e Spisso (2008), patrimônio abrange tanto bens materiais quanto imateriais, sejam eles naturais ou construídos, que pertencem a um indivíduo ou a uma comunidade. O conceito de patrimônio inclui elementos tangíveis, como objetos, edificações e ambientes, assim como aspectos intangíveis, relacionados a saberes, ofícios, celebrações e expressões artísticas e culturais.

O patrimônio arquitetônico pode ser entendido como o conjunto de bens culturais edificados que devem ser preservados como legado para as gerações futuras, uma vez que possuem singularidades culturais capazes de oferecer uma compreensão mais ampla da história humana (Ghirardello e Spisso, 2008). A Carta de Veneza, um documento internacional que define princípios para a conservação e restauração de monumentos e sítios históricos, estabelece que um monumento histórico é toda criação arquitetônica que testemunha uma civilização específica, uma evolução significativa ou um acontecimento histórico relevante (Carta de Veneza, 1964).

A preservação, segundo Ghirardello e Spisso (2008, p. 14), consiste na “manutenção de um bem no estado físico em que se encontra e na desaceleração de sua degradação, visando prolongar e salvaguardar o patrimônio cultural”. Além de assegurar a transmissão da história humana às gerações futuras, a preservação de bens históricos reduz a necessidade de novas construções, diminuindo assim o impacto ambiental.

O tombamento, por sua vez, é um conjunto de ações realizadas pelo poder público com o objetivo de proteger e preservar bens históricos, impedindo sua descaracterização ou destruição por meio de dispositivos legais e promovendo seu uso pleno. O tombamento pode ser parcial ou integral, abrangendo aspectos como volumetria, fachada ou elementos específicos, e pode ocorrer em níveis internacional, nacional, estadual ou municipal (Ghirardello e Spisso, 2008).

Bens tombados podem ser modificados conforme o grau de proteção estabelecido, utilizando metodologias de intervenção adequadas a cada caso. Nesse sentido, muitos termos são usados de forma análoga inadequadamente para se referir a intervenções em edifícios existentes: restauração, reconstrução, reabilitação, requalificação, retrofit, dentre outras.

Daudén (2020) observa que todas essas práticas fazem parte da atuação arquitetônica, pois demandam reflexões específicas sobre o desenho durante a intervenção. A autora distingue o termo "restauro" dos demais, argumentando que ele é uma disciplina autônoma, fundamentada desde o século XIX, voltada exclusivamente à preservação do patrimônio cultural. A restauração busca restabelecer o estado original de um bem, corrigindo danos causados pelo tempo ou por intervenções humanas que tenham comprometido suas características. Esse processo garante a permanência de um testemunho físico e autêntico de épocas passadas, sendo orientado por diretrizes estabelecidas em cartas patrimoniais.

Os outros termos, em geral, referem-se a transformações do objeto para adequá-lo às necessidades contemporâneas. Algumas dessas práticas possuem definições específicas:

- **Reconstrução:** Conforme a Carta de Burra (1980), é o restabelecimento fiel de um estado anterior conhecido de um bem, permitindo o uso de materiais novos ou antigos, ainda que diferentes dos originais.
- **Reabilitação:** Refere-se a intervenções que envolvem mudanças no uso original do programa de um edifício existente (Tofani, 2023).

- **Requalificação:** É um processo que destaca os atributos do bem, promovendo alterações significativas em seus aspectos objetivos e/ou subjetivos de uso (Tofani, 2023).

Tanto a reabilitação quanto a requalificação têm como objetivo comum a conservação e o uso sustentável de bens culturais construídos que estão subutilizados, degradados ou em estado de deterioração social.

O termo retrofit, por sua vez, foi incorporado ao contexto da preservação como uma prática que adapta edificações históricas às demandas dos usuários contemporâneos. Esse processo inclui a aplicação de tecnologias modernas, como sistemas de automação, eficiência energética, dados, proteção contra incêndio e melhorias em instalações elétricas e hidráulicas. Também engloba a renovação de materiais e revestimentos, prolongando a vida útil das edificações e preservando ao máximo suas características originais (Guimarães, 2017).

De forma geral, todas essas intervenções podem ser vistas como instrumentos para promover a sustentabilidade das edificações. Ao prolongar o ciclo de vida dos edifícios existentes e revitalizar seu entorno urbano, essas práticas evitam demolições desnecessárias e reduzem o consumo de energia e de matérias-primas associadas à construção de novas estruturas (Guimarães, 2017).

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS EDIFICAÇÕES

A eficiência energética de um edifício está diretamente relacionada ao seu comportamento térmico, uma vez que grande parte do consumo de energia destina-se a manter condições de conforto no ambiente interno. Esse comportamento resulta da interação entre o meio externo, os espaços internos e os elementos construtivos, incluindo materiais e sistemas técnicos adotados (ABDI, 2017).

Para minimizar o uso de energia, é essencial que os edifícios aproveitem ao máximo os recursos naturais, como ventilação e iluminação, além das propriedades térmicas dos materiais construtivos. A escolha adequada desses materiais e soluções arquitetônicas, considerando o clima local, reduz a necessidade de sistemas mecânicos de climatização, promovendo maior eficiência energética (Frota e Schiffer, 2001).

Entre os principais fatores que influenciam a eficiência energética, destacam-se as propriedades térmicas da envoltória da edificação, composta por paredes,

coberturas e pisos. O isolamento térmico reduz a troca de calor entre o edifício e o ambiente externo, enquanto a inércia térmica permite armazenar calor, ajudando a manter a temperatura interna estável e amenizando variações bruscas de calor e frio (Isolani, 2008). Além dessas características construtivas, os sistemas de climatização e iluminação representam os principais consumidores de energia nos edifícios (Coelho, 2020).

Renou-Maisant, Abdesselam e Bonnet (2022) ressaltam que a compreensão da eficiência energética deve levar em conta fatores como a capacidade energética do país, suas condições climáticas, políticas públicas e a evolução histórica das construções. Assim, cada país desenvolve estratégias específicas para melhorar o desempenho energético das edificações.

A eficiência energética pode ser aprimorada de duas formas: pela redução do consumo ou pelo uso mais eficiente da energia disponível, por meio de tecnologias e materiais de alto desempenho. No caso de edificações históricas protegidas, qualquer intervenção deve ser compatível com o grau de preservação exigido.

A etiquetagem de eficiência energética em edificações tem se consolidado globalmente. No Brasil, o Programa Brasileiro de Etiquetagem de Edificações (PBE Edifica) estabelece diretrizes para a classificação de edificações quanto ao desempenho energético. A Instrução Normativa do Inmetro (INI-C) define os critérios e métodos para essa avaliação, resultando na emissão da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) (Muta, 2022).

A INI-C foi desenvolvida a partir de pesquisas do Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (Procel Edifica) em colaboração com o Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E). Seu objetivo é aprimorar os métodos de avaliação e classificação da eficiência energética de edificações comerciais, de serviços e públicas (Muta, 2022).

A etiquetagem segue regulamentos técnicos do Inmetro e avalia o desempenho térmico da envoltória, bem como o consumo de energia primária dos sistemas e equipamentos, como climatização, iluminação e aquecimento de água. A INI-C utiliza um método simplificado, com modelos específicos para edificações climatizadas artificialmente e para aquelas ventiladas naturalmente ou em sistema híbrido (Muta, 2022).

A avaliação compara o consumo energético da edificação real (CEP, real) com o de uma edificação de referência (CEP, ref), correspondente à classe D de eficiência

energética. A classificação pode ser efetuada por meio de simulação computacional, utilizando *softwares* como o EnergyPlus, que mensuram o consumo energético e aplicam critérios normativos para definir a classe da edificação (Muta, 2022).

Após a análise, a ENCE pode ser emitida para edificações em fase de projeto ou já construídas. Para obtê-la, é necessário contatar um Organismo de Inspeção Acreditado (OIA) pelo Inmetro. No entanto, a avaliação energética é um processo complexo, e o número de OIAs disponíveis ainda é reduzido (Gomes, 2017).

A etiquetagem pode ser realizada por dois métodos: prescritivo ou por simulação. Embora o método prescritivo seja amplamente utilizado, ele apresenta limitações por basear-se em índices que nem sempre refletem o consumo real de energia (Melo, 2012). Já o método de simulação computacional oferece resultados mais precisos, mas exige maior conhecimento técnico, tempo e informações detalhadas do projeto, tornando-o mais oneroso.

O método por simulação possui alguns pré-requisitos específicos para o programa e para o arquivo climático a ser utilizado. O programa deve estar validado pela norma ASHRAE *Standard* 140, simular todas as horas do ano e permitir a modelagem de multi-zonas térmicas, entre outros (BRASIL, 2022). Em relação ao arquivo climático, o regulamento estabelece que ele deve, no mínimo, conter “valores horários para todos os parâmetros relevantes requeridos pelo programa, e (...) ser representativo da Zona Bioclimática onde o projeto será locado (...)” (BRASIL, 2022, Anexo C.I, p. 106). Além disso, recomenda-se a utilização de arquivos climáticos disponibilizados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos ou de arquivos validados por um laboratório de referência (BRASIL, 2022).

Em edificações históricas, eventuais intervenções precisam conciliar eficiência energética com a preservação dos valores históricos e culturais. Roberti *et al.* (2015, 2017) destacam que algumas estratégias podem ser aplicadas a qualquer edificação histórica, enquanto outras exigem análises caso a caso para garantir soluções compatíveis com suas características específicas.

Intervenções para melhoria do desempenho energético em edifícios históricos devem ser cuidadosamente avaliadas, pois podem envolver altos custos e complexidade técnica. É fundamental uma abordagem holística da edificação para alcançar resultados satisfatórios (Japiassu, 2019). Nesse contexto, o uso do BIM pode facilitar a análise energética de edificações existentes, mesmo aquelas com restrições de intervenção devido à proteção patrimonial.

2.3 BUILDING INFORMATION MODELING (BIM)

BIM pode ser compreendido como uma tecnologia de modelagem e um conjunto de processos voltados para a criação, comunicação e análise de modelos digitais da construção. Esses modelos representam elementos da edificação e incorporam dados sobre suas características geométricas, materiais, comportamento e localização no projeto (Sacks *et al.*, 2021). Além disso, o BIM pode ser interpretado sob três perspectivas: como um produto, uma tecnologia da informação ou um requisito para o gerenciamento de instalações (Dantas, 2022).

Para Succar (2009), BIM é um conjunto interativo de políticas, processos e tecnologias gerando uma metodologia para gerenciar dados essenciais de projeto em formato digital durante todo o ciclo de vida de uma edificação.

O BIM tem revolucionado a concepção e execução de projetos ao viabilizar a gestão de dados da edificação por meio de um modelo digital tridimensional. Diferentemente dos sistemas *Computer Aided Design* (CAD) – projeto assistido por computador, que representam elementos construtivos através de pontos, linhas e formas bidimensionais, o BIM utiliza objetos digitais que incorporam informações detalhadas sobre os componentes que representam, incluindo aspectos como custo, fabricante, modelo, material, potência e vazão, entre outros. A capacidade de vincular dados aos elementos do modelo digital é um dos principais diferenciais do BIM (Dantas, 2022).

O BIM viabiliza a visualização dos estudos preliminares e possibilita a avaliação de aspectos como eficiência energética, conforto térmico e acústico, segurança contra incêndios, estrutura, custos e viabilidade construtiva. Além disso, permite a colaboração simultânea entre diferentes especialidades e o gerenciamento de dados ao longo do ciclo de vida da edificação, reunindo disciplinas e sistemas em um modelo único que favorece a colaboração eficiente (Khudhair, 2021). Durante a execução, auxilia construtores e subcontratados na compreensão precisa das tarefas, reduzindo erros e desperdícios. Sua aplicação pode ocorrer em qualquer fase da construção, desde o projeto até a operação e manutenção da edificação (Panteli, Kylili e Fokaidis, 2020).

2.3.1 Dimensões BIM

As dimensões do BIM representam níveis adicionais de informação que enriquecem o modelo digital, proporcionando uma compreensão mais profunda do projeto à medida que novas informações são incorporadas. Devido à contínua expansão de suas aplicações, alguns autores descrevem o BIM como um conceito “nD”, destacando sua capacidade de integrar múltiplas informações e usos (Hussain e Erzaij, 2020). Embora não haja consenso sobre um limite máximo de dimensões, a literatura já menciona até dez delas.

A Figura 3 ilustra a sequência de dimensões ao longo da cadeia de produção BIM.

Figura 3 – Dimensões BIM.



Fonte: Almeida, M. (Linkedin Prof. Dra. Maria Almeida).

A **1D** corresponde à implementação de protocolos BIM. A **2D** refere-se à introdução de fluxos de trabalho colaborativos. A **3D** está relacionada à modelagem digital parametrizada, captura da realidade e compatibilização entre diferentes especialidades. A **4D** incorpora o fator tempo, permitindo a visualização do cronograma da obra e o gerenciamento de riscos. A **5D** agrega informações de custos, associando cada elemento do modelo a dados financeiros, como orçamento, origem, instalação e manutenção. A **6D** aborda a eficiência energética e a sustentabilidade, considerando aspectos ambientais, econômicos e sociais. A **7D** foca na gestão e manutenção do edifício ao longo de seu ciclo de vida (*Facility Management*). A **8D** está ligada à segurança do trabalho, promovendo práticas para a redução de acidentes. A **9D** diz respeito à construção enxuta (*Lean Construction*), otimizando e racionalizando processos por meio da digitalização. Por fim, a **10D** tem como objetivo a industrialização da construção, impulsionando a produtividade do setor com a integração de novas tecnologias digitais (Betim, 2022; Sacks, 2021).

2.3.2 Nível de desenvolvimento

Um modelo BIM abrange uma ampla variedade de elementos, incluindo informações gráficas, como volume e dimensões, e dados não gráficos, como composição, fabricante e custos. O produto entregue depende das demandas e das diferentes etapas do projeto, de acordo com o nível de informação exigido. Um nível de informação bem definido auxilia no planejamento e na extração eficaz de informações do modelo.

De acordo com Djukic, Caires e Lino (2024), a gestão do nível de desenvolvimento e da qualidade das informações é fundamental, pois a precisão de qualquer análise depende diretamente da qualidade dos dados. O uso de informações adequadas não apenas previne a geração excessiva ou insuficiente de dados, mas também facilita a automação dos controles.

A norma ABNT NBR ISO 19650-1 (2022) destaca que, antes de considerar a informação em si, é essencial compreender o motivo de sua necessidade. Ela identifica quatro fatores principais: objetivo (necessidade a ser atendida), conteúdo (tipo de informação, seja geral, geométrica ou alfanumérica), forma (maneira como a informação é apresentada, como um desenho) e formato (código utilizado, como o IFC).

Nesse contexto, um aspecto importante é o “nível de desenvolvimento” ou “nível de informação”. Durante muito tempo, os termos *Level of Detail* (LoD) e *Level of Development* (LOD) foram utilizados de maneira equivocada. É fundamental esclarecer que o nível de detalhe (LoD) é uma medida quantitativa, pressupondo que todas as informações fornecidas são relevantes e confiáveis. Por outro lado, o nível de desenvolvimento (LOD) assegura a confiabilidade das informações, garantindo uma saída de dados precisa (Djukic, Caires e Lino, 2024).

Para evitar confusões entre os termos, foi introduzido o conceito de Nível de Necessidade de Informação (*Level of Information Need*), ou resumidamente *Level of Information* (LOI), que se concentra apenas nos dados necessários para a execução de uma tarefa específica, como a análise energética, por exemplo (Djukic, Caires e Lino, 2024).

Conforme a norma ABNT NBR ISO 19650-1 (2022), o nível de necessidade de informação é definido pela quantidade mínima de dados necessários para atender aos

requisitos relevantes, sendo que qualquer informação além disso é considerada desperdício.

Não existe uma definição global para os níveis de LOD. A classificação mais amplamente adotada foi sugerida pelo *American Institute of Architects* (2013) – Instituto Americano de Arquitetura. O AIA definiu cinco níveis de LOD no documento “*Project Building Information Modeling Protocol Forms*”:

- LOD 100 – Definição do produto – Estudo Preliminar;
- LOD 200 – Definição do produto – Anteprojeto;
- LOD 300 – Definição do produto – Projeto Legal;
- LOD 350 – Identificação e solução de interfaces – Projeto Básico;
- LOD 400 – Projeto de detalhamento de especialidades – Projeto Executivo;
- LOD 500 – Pós-entrega da obra – Obra concluída (*As Built*).

A norma internacional ISO 19650 (2018) é composta por seis partes, das quais apenas as duas primeiras foram traduzidas para o português (ABNT NBR ISO 19650-1 e 19650-2). A ISO 19650 (2018) estabelece diretrizes para a gestão de informações no ciclo de vida de edifícios com BIM. Não mais é definido níveis de desenvolvimento e sim níveis de informação para as diferentes fases do projeto: LOI 100 (informações mínimas para fases iniciais), LOI 200 (detalhamento para estudos preliminares), LOI 300 (especificações técnicas para o projeto detalhado) e LOI 400 (detalhes necessários para fabricação e montagem).

Modelos voltados para edificações históricas, geralmente construídos por meio de engenharia reversa, tendem a ter um alto nível de informação. Quanto mais próximo o modelo estiver do nível *as-built*, mais precisas serão as análises de incompatibilidades entre as propostas de projeto e as restrições de preservação da edificação histórica.

2.3.3 Interoperabilidade

Sacks *et al.* (2021) definem interoperabilidade como a capacidade de diferentes *softwares* trocarem dados e, simultaneamente, contribuir de forma conjunta para o desenvolvimento de um trabalho. Segundo os autores, nenhum *software* é capaz de suportar, isoladamente, todas as tarefas associadas ao projeto, execução e gestão de uma construção. A interoperabilidade refere-se à transferência de dados entre *softwares* sem que haja perdas ou prejuízos no conteúdo, permitindo que todos os

envolvidos no processo de concepção, execução e gestão da edificação tenham acesso e possam contribuir ao longo do desenvolvimento do trabalho (Sacks *et al.*, 2021).

Moura e Costa (2020) classificam os problemas de troca de informações em três dimensões da interoperabilidade: semântica, tecnológica e de processo. A interoperabilidade semântica é descrita como a capacidade de sistemas ou ferramentas distintas compreenderem corretamente os significados dos dados trocados entre eles. Em outras palavras, trata-se de garantir que as informações compartilhadas tenham significados consistentes e compreensíveis, independentemente das diferenças entre sistemas ou formatos de dados. A interoperabilidade tecnológica diz respeito às ferramentas, sistemas e métodos empregados para capturar, modelar, armazenar e compartilhar informações relacionadas ao edifício histórico. Já a interoperabilidade de processos refere-se à sequência de etapas e atividades realizadas para alcançar um objetivo específico, garantindo que as diversas fases de criação e uso dos modelos sejam harmônicas e que a informação seja transferida de forma eficiente entre elas (Moura e Costa, 2020).

No que tange à interoperabilidade entre BIM e BEM, o compartilhamento de informações entre as ferramentas de criação atualmente depende dos formatos abertos de troca do IFC (*Industry Foundation Classes*) e do gbXML (*Green Building XML*). O IFC foi concebido como um formato de arquivo digital aberto e neutro que facilita a troca de informações entre diferentes aplicativos de *software* BIM (Kamel e Memari, 2019). Ele representa de forma abrangente os elementos de construção e suas propriedades, permitindo modelagem detalhada e colaboração entre diferentes plataformas de *software*. Em contrapartida, o gbXML é especificamente projetado para fins de simulação de energia e pode armazenar uma ampla gama de informações necessárias para essa simulação, tornando-o adequado para aplicações BEM. No entanto, a integração entre IFC e gbXML não é direta devido às diferenças nas abordagens de modelagem, linguagens e protocolos empregados por esses sistemas (Kamel e Memari, 2019).

É importante notar que a transferência de informações de um programa de modelagem BIM para um programa de simulação energética ocorre de forma unidirecional. As ferramentas de simulação energética não têm a capacidade de devolver as alterações feitas no modelo energético para o programa de criação.

Assim, qualquer modificação necessária no modelo de simulação de energia deve ser feita diretamente no aplicativo de projeto BIM (ABDI, 2017).

A complexidade da geometria em simulações digitais pode resultar em gargalos computacionais (Panagiotidou e Körner, 2022). Modelos de simulação baseados em BIM frequentemente geram contagens elevadas de polígonos, tornando as simulações mais demoradas e difíceis de controlar. Ferramentas de simulação de desempenho de edifícios (*Building Performance Simulation*) geralmente requerem modelos com malha quadrada regular para tarefas como análise de luz natural, dinâmica de fluidos computacional ou simulações de segurança. Além disso, sistemas BIM e BEM podem empregar diferentes núcleos de geometria e dicionários de dados, impactando seu desempenho e a compatibilidade com diversas ferramentas (Costa e Sicilia, 2022). Essas discrepâncias nas estruturas de dados subjacentes podem dificultar a troca eficiente de informações e a integração entre os dois sistemas, complicando ainda mais o desafio da interoperabilidade. A tecnologia de *big data* pode auxiliar na resolução desses problemas, pois tem o potencial de cruzar informações de diferentes fontes (Costa e Sicilia, 2022). Ainda segundo os autores, o próprio modelo BIM deveria ser capaz de realizar essa tarefa por meio de dados interoperáveis, mas ainda não apresenta um desempenho completo e satisfatório nesse aspecto.

Os desafios associados à interoperabilidade entre BIM e BEM refletem a complexidade da integração de diferentes ferramentas e sistemas em um fluxo de trabalho unificado. Embora existam padrões como o IFC e o gbXML, que buscam facilitar essa comunicação, as discrepâncias nas abordagens de modelagem e nos protocolos utilizados pelos diferentes *softwares* frequentemente resultam em perda de dados e dificuldades na integração.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DA FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A Fundamentação Teórica apresentada buscou contextualizar os principais conceitos relacionados ao patrimônio histórico, à eficiência energética das edificações e ao BIM. A seguir, a Revisão Sistemática de Literatura aprofunda a discussão ao investigar pesquisas já realizadas sobre essa temática, permitindo identificar lacunas e oportunidades para o desenvolvimento do presente estudo.

3 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é o ponto de partida para a construção do conhecimento deste trabalho, a fim de compreender o estado da arte sobre o uso do BIM em análises energéticas de edificações históricas.

Os procedimentos necessários para o êxito desta RSL foram divididos em quatro etapas:

- i. Investigação preliminar de existência de RSL que responde à seguinte pergunta: quais as contribuições do BIM para a eficiência energética de edificações históricas?
- ii. Seleção dos artigos para o portfólio bibliográfico;
- iii. Análise bibliométrica;
- iv. Análise sistemática dos artigos.

3.1 INVESTIGAÇÃO PRELIMINAR

Antes de iniciada a RSL, foi verificado nas bases de dados *Web of Science* (Coleção Principal), *Science Direct* e *Scopus* se existe alguma RSL que buscou responder à mesma pergunta de pesquisa alvo deste trabalho. A pesquisa foi feita no dia 18 de maio de 2024, utilizando a seguinte estratégia de busca para as bases *Web of Science* (Coleção Principal) e *Scopus*: (“BIM” OR “*Building Information Modeling*” OR “BEM” OR “*Building Energy Modeling*” OR “HBIM” OR “*Heritage Building Information Modeling*”) AND (“*Historic*” OR “*Heritage*”) AND (“*Energy Efficiency*” OR “*Energy Performance*” OR “*Energy Conservation*”). Na *Science Direct* só é permitido utilizar até 8 operadores booleanos. Portanto, optou-se por excluir as siglas BIM, BEM e HBIM da busca.

A opção por realizar a busca utilizando exclusivamente palavras-chave em inglês se justifica pela abrangência e internacionalização da literatura científica disponível nas bases de dados consultadas.

Para todas as bases de dados utilizou-se dois filtros: o filtro de pesquisa em “tópico”, que executa a busca no título, resumo e palavras-chave do autor, e o filtro “Artigo de Revisão”. Não foi utilizado filtro para restringir o ano das publicações.

Na *Web of Science* (Coleção Principal) foram encontrados seis artigos de RSL; na *Science Direct*, dois; e na *Scopus*, nove.

O Quadro 1 resume a busca realizada.

Quadro 1 – Estratégia de Busca (Investigação Preliminar).

Base de Dados	Busca Realizada	Filtros	Data de Busca	Quantidade de artigos de RSL encontrados
<i>Web of Science</i> (Coleção Principal)	("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "BEM" OR "Building Energy Modeling" OR "HBIM" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa em tópico (Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigo de Revisão. 	18/05/2024	6
<i>Science Direct</i>	("Building Information Modeling" OR "Building Energy Modeling" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigo de Revisão. 	18/05/2024	2
<i>Scopus</i>	("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "BEM" OR "Building Energy Modeling" OR "HBIM" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigo de Revisão. 	18/05/2024	9

Fonte: A autora.

Dentre os artigos encontrados nas três bases de dados, alguns eram repetidos. Após filtrá-los e remover as duplicatas, procedeu-se à análise dos títulos e dos resumos, selecionando para leitura integral aqueles que pareciam apresentar uma proposta similar à da RSL desenvolvida neste trabalho.

No Quadro 2, estão relacionadas as referências de todos os artigos encontrados na busca. Apenas o primeiro foi selecionado para a leitura integral.

Quadro 2 – Artigos de RSL para verificação de similaridade.

Artigos	Base de Dados
COSTA, A.; CUPERSCHMID, A.; NEVES, L. HBIM and BEM association: Systematic literature review. Journal of Cultural Heritage , v. 66, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science, Science Direct e Scopus
ALHAMMAD, M.; EAMES, M.; VINAI, R. Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review. Buildings , v. 14, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/buildings14030581 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science
SHEHATA, A. <i>et al.</i> Holistic SWOT based matrix of BIM adoption in heritage green retrofitting processes. Architectural Engineering and Design Management , 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/17452007.2024.2337933 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science
SUTHERLAND, N. <i>et al.</i> InfraRed Thermography and 3D-Data Fusion for Architectural Heritage: A Scoping Review. Remote Sensing , v. 15, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/rs15092422 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science e Scopus
FATHI, S. <i>et al.</i> Machine learning applications in urban building energy performance forecasting: A systematic review. Renewable & Sustainable Energy Reviews , v. 133, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.110287 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science, Science Direct e Scopus
BELLAGARDA, A. <i>et al.</i> Effectiveness of neural networks and transfer learning for indoor air-temperature forecasting. Automation in Construction , v. 140, 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104314 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Web of Science e Scopus
CASINI, M. Extended Reality for Smart Building Operation and Maintenance: A Review. Energies , v. 15, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15103785 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Scopus
LIAO, L. <i>et al.</i> Evaluation of Complexity Issues in Building Information Modeling Diffusion Research. Sustainability , v. 14, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su14053005 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Scopus
MOHANTA, A.; DAS, S. Causal Analysis of Slow BIM Adoption in Eastern India with a Special Focus on Green Building Sector. Journal of the Institution of Engineers , v. 103, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s40030-021-00561-w . Acesso em 18 de maio de 2024.	Scopus
KAMEL, E. A Systematic Literature Review of Physics-Based Urban Building Energy Modeling (UBEM) Tools, Data Sources, and Challenges for Energy Conservation. Energies , v. 15, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/en15228649 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Scopus
COSTA, G. <i>et al.</i> A catalogue of energy conservation measures (ECM) and a tool for their application in energy simulation models. Journal of Building Engineering , v. 29, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104314 . Acesso em 18 de maio de 2024.	Scopus

Fonte: A autora.

O trabalho de Costa, Cuperschmid e Neves (2024) apresenta objetivos parecidos a esta dissertação, pois busca investigar como o HBIM (*Heritage Building Information Modeling*) e o BEM (*Building Energy Modeling*) podem ser utilizados como ferramentas eficazes de simulação computacional e como a associação de HBIM e BEM tem sido feita. Porém, a proposta da RSL feita para esta dissertação de mestrado se difere por se propor a investigar a produção científica sobre o uso do BIM em análises energéticas de edificações históricas. É uma proposta mais abrangente e não focada apenas na ação associada entre HBIM e BEM. Além disso, o processo metodológico utilizado na RSL desses autores foi o método PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) e não o ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), método escolhido para esta pesquisa, portanto, o critério de inclusão e exclusão de material bibliográfico foi diferente.

Sendo assim, constatou-se que a RSL a que se propõe o presente capítulo é de relevância para o meio científico e acadêmico e fundamental para o desenvolvimento sólido da base teórica desta dissertação.

3.2 SELEÇÃO DOS ARTIGOS PARA O PORTIFÓLIO BIBLIOGRÁFICO

Para que outros pesquisadores possam reproduzir a busca realizada nesta pesquisa, é necessário esclarecer alguns pontos: a data em que a busca foi feita; o processo metodológico de seleção dos artigos; as bases de dados utilizadas e as palavras-chave empregadas, juntamente com os operadores booleanos e os filtros aplicados.

3.2.1 Data da pesquisa

Os procedimentos de busca descritos abaixo foram realizados em 23 de maio de 2024.

3.2.2 Processo metodológico de seleção dos artigos

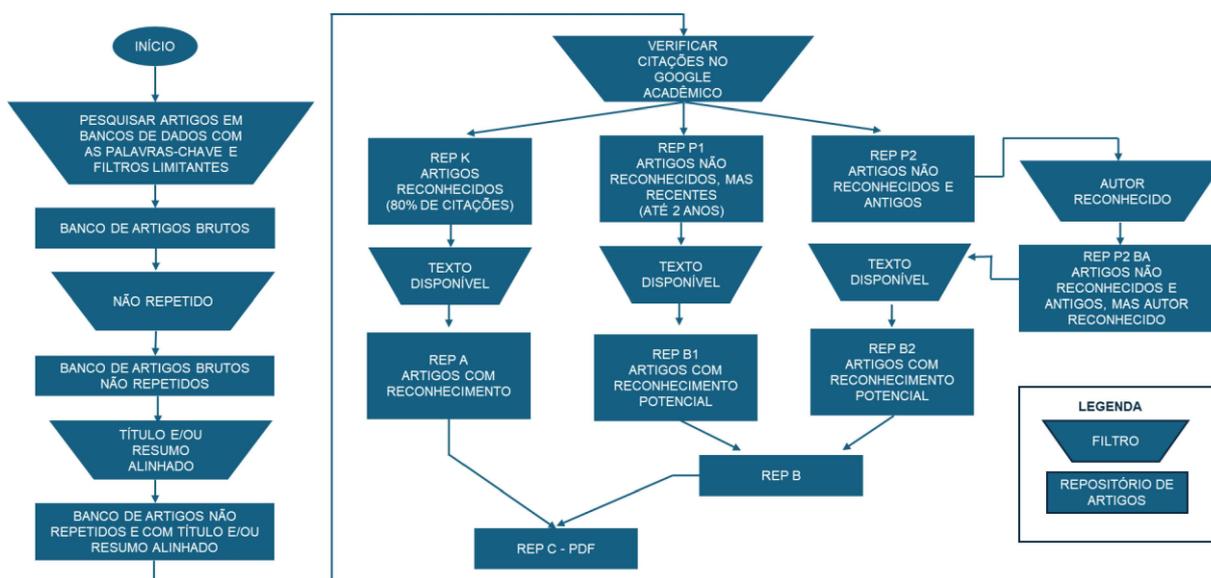
Este estudo adotou o processo ProKnow-C (*Knowledge Development Process – Constructivist*), que é um processo estruturado de construção do conhecimento para iniciar a pesquisa acerca de um tema a ser investigado (Ensslin *et al.*, 2015; Afonso *et al.*, 2012; Vaz *et al.*, 2013). Como os autores descrevem, o Proknow-C oferece uma estratégia para a busca de artigos onde os trabalhos não alinhados ou não relevantes são filtrados e descartados. A relevância científica é definida pelo número de citações que um artigo recebeu. No final do processo, os artigos selecionados comporão o portfólio bibliográfico deste trabalho.

O método Proknow-C foi escolhido por ser considerado o mais adequado para o problema de pesquisa a ser investigado. Como no Proknow-C a leitura sistemática é realizada antes do estabelecimento da relevância do artigo, evita-se que bons trabalhos sejam dispensados prematuramente. Por ser um tema emergente, muitos artigos ainda não possuem grandes quantidades de citações e, devido a isso, poderiam ser descartados se fosse utilizado só o critério de relevância por número de citações, como em outros processos de seleção de artigos.

Carvalho *et al.* (2017) sugerem que, inicialmente, seja utilizado o filtro de alinhamento dos títulos, no qual o pesquisador realiza uma leitura sistemática dos títulos e decide se estão ou não alinhados com o tema da pesquisa, descartando os artigos com títulos não alinhados. Posteriormente, é feita a filtragem pelo alinhamento dos resumos dos artigos. Nesta revisão sistemática da literatura em particular, optou-se por realizar a leitura sistemática dos títulos e dos resumos simultaneamente, devido ao pequeno número de artigos na amostra, que consiste em apenas 124 artigos no banco de artigos bruto.

Dessa forma, o método de seleção de artigos utilizado neste trabalho foi adaptado. Não houve perda no processo, uma vez que o filtro de leitura sistemática de títulos e resumos aumenta as chances de inclusão de artigos relevantes no portfólio bibliográfico. A Figura 6 mostra o fluxo de filtragem dos artigos através da adaptação do método ProKnow - C.

Figura 4 – Método adaptado de seleção de artigos – Proknow – C.



Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2017, p.86).

3.2.3 Bases de dados

A revisão teórica iniciou com a escolha das bases de dados que delimitou o campo amostral dos artigos. As bases de dados escolhidas foram a *Web of Science* (Coleção Principal), *Science Direct* e *Scopus*, devido à sua alta relevância na área da arquitetura e das engenharias.

3.2.4 Palavras-chave, operadores booleanos e filtros

As palavras-chave e os operadores booleanos empregados foram os mesmos utilizados na busca da Investigação Preliminar (Seção 3.1). Apenas os filtros foram diferentes, pois agora não interessam os artigos de revisão, apenas os artigos originais que apresentam resultados empíricos. Inclusive artigos de revisão não devem compor o portfólio bibliográfico.

Foi utilizada a seguinte estratégia de busca para as bases *Web of Science* (Coleção Principal) e *Scopus*: (“BIM” OR “Building Information Modeling” OR “BEM” OR “Building Energy Modeling” OR “HBIM” OR “Heritage Building Information Modeling”) AND (“Historic” OR “Heritage”) AND (“Energy Efficiency” OR “Energy Performance” OR “Energy Conservation”). Como relatado na Seção 3.1, na *Science*

Direct só é permitido utilizar até 8 operadores booleanos, portanto, optou-se por excluir as siglas BIM, BEM e HBIM da busca.

Para todas as bases de dados utilizou-se dois filtros: o filtro de pesquisa em tópico (Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor) e o filtro “Artigo” (como aparece na base *Web of Science*) ou “Artigos de Pesquisa” (como aparece nas bases *Science Direct* e *Scopus*). Não foi utilizado filtro para restringir o ano das publicações.

3.2.5 Resultado das buscas

Utilizando as palavras-chave previamente definidas, em conjunto com os operadores booleanos e os filtros estabelecidos, foram identificados 29 artigos na *Web of Science* (Coleção Principal), 11 na *Science Direct* e 84 na *Scopus*.

O Quadro 3 apresenta o resumo da busca realizada.

Quadro 3 – Resumo da busca de artigos.

Base de Dados	Busca Realizada	Filtros	Data de Busca	Quantidade de artigos encontrados
<i>Web of Science</i> (Coleção Principal)	("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "BEM" OR "Building Energy Modeling" OR "HBIM" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa em tópico (Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigo. 	23/05/2024	29
<i>Science Direct</i>	("Building Information Modeling" OR "Building Energy Modeling" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigos de pesquisa. 	23/05/2024	11
<i>Scopus</i>	("BIM" OR "Building Information Modeling" OR "BEM" OR "Building Energy Modeling" OR "HBIM" OR "Heritage Building Information Modeling") AND ("Historic" OR "Heritage") AND ("Energy Efficiency" OR "Energy Performance" OR "Energy Conservation")	<ul style="list-style-type: none"> • Pesquisa no título, resumo e palavras-chave do autor); • Artigos de pesquisa. 	23/05/2024	84
Total de artigos no banco de artigos brutos				124

Fonte: A autora.

No total, foram encontrados 124 artigos que compuseram o banco de artigos brutos. Aplicando o método adaptado de seleção de artigos (ProKnow – C), na primeira etapa de filtragem, foram excluídos os artigos duplicados, reduzindo o total para 96 artigos. Em seguida, foi realizada uma leitura sistemática dos títulos e resumos, excluindo-se aqueles não alinhados ao tema de pesquisa, resultando em uma amostra de 28 artigos. Após essa etapa, foi verificada a quantidade de citações de cada artigo no Google Acadêmico.

Para determinar os artigos mais reconhecidos, foi aplicado o Princípio de Pareto (regra 80/20), segundo o qual 80% dos resultados são atribuíveis a 20% das

causas. Com base nesse princípio, estabeleceu-se que os artigos com aproximadamente 80% das citações acumuladas seriam considerados de grande relevância. A régua de corte foi aplicada no artigo que possuía 79,2% das citações acumuladas, resultando em dez artigos definidos como altamente reconhecidos. O último filtro aplicado foi a verificação da disponibilidade gratuita dos artigos na internet. Todos os dez artigos selecionados estavam disponíveis gratuitamente.

Após a verificação do reconhecimento, foram analisadas as datas de publicação dos trabalhos que não passaram pelo filtro de reconhecimento. Artigos considerados recentes, publicados nos anos de 2022, 2023 e 2024, foram reinsertos no banco de artigos (13 artigos). Após verificar a disponibilidade dos artigos, foi constatado que um dos artigos, que compunha o grupo dos artigos não reconhecidos, mas recentes, não tinha acesso livre disponível. Sendo assim, apenas 12 artigos foram reinsertos no banco de dados.

Posteriormente, foi desenvolvido o Banco de Autores a partir dos autores dos artigos mais citados (artigos com reconhecimento). No total, 41 autores compuseram o Banco de Autores.

Em relação aos artigos não reconhecidos e antigos (5 artigos), verificou-se se algum deles havia sido escrito por autores do Banco de Autores. Nenhum desses artigos foi selecionado nesse filtro.

Somando-se os artigos reconhecidos (10) com os artigos não reconhecidos, mas recentes (12), obtém-se um total de 22 artigos que compõem o portfólio bibliográfico desta pesquisa. Esses artigos estão listados no Quadro 4 e no Quadro 5.

Quadro 4 – Artigos reconhecidos do portfólio bibliográfico.

Artigos Reconhecidos	N.º de citações
PISELLI, C. <i>et al.</i> An Integrated HBIM Simulation Approach for Energy Retrofit of Historical Buildings Implemented in a Case Study of a Medieval Fortress in Italy. Energies , v.13, 2020a. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/en13102601 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	49
PRIZEMAN, O. HBIM and matching techniques: considerations for late nineteenth- and early twentieth-century buildings. Journal of Architectural Conservation , v. 21, 2015. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/13556207.2016.1139852 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	35
PISELLI, C. <i>et al.</i> Facility Energy Management Application of HBIM for Historical Low-Carbon Communities: Design, Modelling and Operation Control of Geothermal Energy Retrofit in a Real Italian Case Study. Energies , v. 13, 2020b. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/en13236338 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	34
KHALIL, A.; HAMMOUDA, N.; EL-DEEB, K. Implementing sustainability in retrofitting heritage buildings. Case study: Villa antoniadis, Alexandria, Egypt. Heritage , v. 1, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.3390/heritage1010006 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	24
CARO-MARTÍNEZ, R.; SENDRA, J. Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study. International Journal of Sustainable Development and Planning , v. 13, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-528-540 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	23
NAGY, G.; ASHRAF, F. HBIM platform & smart sensing as a tool for monitoring and visualizing energy performance of heritage buildings. Developments in the Built Environment , v. 8, 2021. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100056 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	20
MEONI, A. <i>et al.</i> Integration of structural performance and human-centric comfort monitoring in historical building information modeling. Automation in Construction , v. 138, 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104220 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	18
ETXEPARE, L. <i>et al.</i> Advanced Intervention Protocol in the Energy Rehabilitation of Heritage Buildings: A Minones Barracks Case Study. Sustainability , v. 12, 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/su12156270 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	18
CALCERANO, F. <i>et al.</i> Energy and environmental improvement of built heritage: HBIM simulation-based approach applied to nine Mediterranean case-studies. Building Research and Information , v. 52, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2023.2204417 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	13
JIANG, W. <i>et al.</i> Protective energy-saving retrofits of rammed earth heritage buildings using multi-objective optimization. Case Studies in Thermal Engineering , v. 38, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102343 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	13

Fonte: A autora.

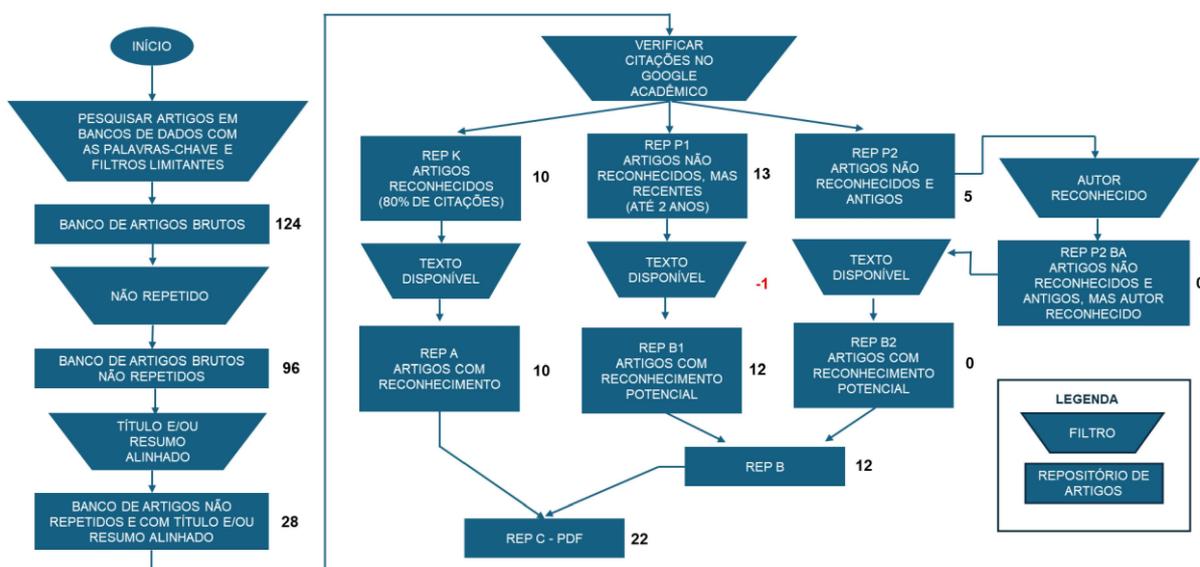
Quadro 5 – Artigos recentes do portfólio bibliográfico.

POCHWALA, S. <i>et al.</i> Energy source impact on the economic and environmental effects of retrofitting a heritage building with a heat pump system. Energy , v. 278, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2023.128037 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
CINQUEPALMI, F. <i>et al.</i> Efficiency and Sustainability: The Role of Digitization in Re-Inhabiting the Existing Building Stock. Energies , v. 16, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/en16093613 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
LUCCHI E.; AGLIATA, R. HBIM-based workflow for the integration of advanced fotovoltaic systems in historical buildings. Journal of Cultural Heritage , v. 64, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.10.015 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
MASSAFRA, A. <i>et al.</i> Building Information Modeling and Building Performance Simulation-Based Decision Support Systems for Improved Built Heritage Operation. Sustainability , v. 15, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.3390/su151411240 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
ZHANG, J. <i>et al.</i> Multi-indicator adaptive HVAC control system for low-energy indoor air quality management of heritage building preservation. Building and Environment , v. 246, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110910 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
ABDULLAH, O.; HATEM, W. Alternative Construction using BIM in Old Educational Buildings. Engineering Technology & Applied Science Research , v. 13, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.48084/etasr.5390 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
WANG, H. <i>et al.</i> How occupant positioning systems can be applied to help historic residences manage energy consumption: A case study in China. Building and Environment , v. 249, 2024. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111110 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2024
ABDULLAH, O.; HATEM, W. The use of BIM to propose alternative construction methods to reduce the cost of energy for the historic archeological building in Iraq. Archives of Civil Engineering , v. 69, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.24425/ace.2023.145283 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
BEVILACQUA, M. <i>et al.</i> The horizon europe buildchain project presentation: trustworthy building life-cycle knowledge graph for sustainability and energy efficiency. Sciens-it-Scientific Research and Information Technology , v. 13, 2023. Disponível em: http://dx.doi.org/10.2423/i22394303v13n2p137 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
YOUNIS, A.; TAWALBEH, M. Innovative Energy Retrofit Approach of Historical Buildings Using HBIM Process: The Guest House of Al-Karak Greater Municipality in Jordan a Case Study. Civil Engineering and Architecture , v. 12, 2024. Disponível em: https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85184727576&doi=10.13189%2fcea.2024.120239&partnerID=40&md5=4ad5dffbb747432dd0f74b9b9b6fd98c . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2024
CURTO, D. <i>et al.</i> Energy Efficiency in Historic Architecture: The “Ex Institute of Zoology and Comparative Anatomy” in Palermo. Applied Sciences (Switzerland) , v. 13, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app13158882 . Acesso em: 03 de junho de 2024.	2023
ALSAID, A. <i>et al.</i> Methodology to Improve Energy Efficiency of Heritage Buildings Using HBIM - Sabil Qaitbay: A Case Study from Egypt. Civil Engineering and Architecture , v. 11, 2023. Disponível em:	2023

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85145374917&doi=10.13189%2fcea.2023.110134&partnerID=40&md5=e3a285ae0b56c77b8d15687d7c5db4c5>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

A Figura 5 ilustra a quantidade de artigos encontrados após a aplicação de cada filtro.

Figura 5 – Aplicação dos filtros – ProKnow – C.



Fonte: Adaptado de Carvalho *et al.* (2017, p.86).

Para um efetivo gerenciamento das referências, utilizou-se o programa Microsoft Excel.

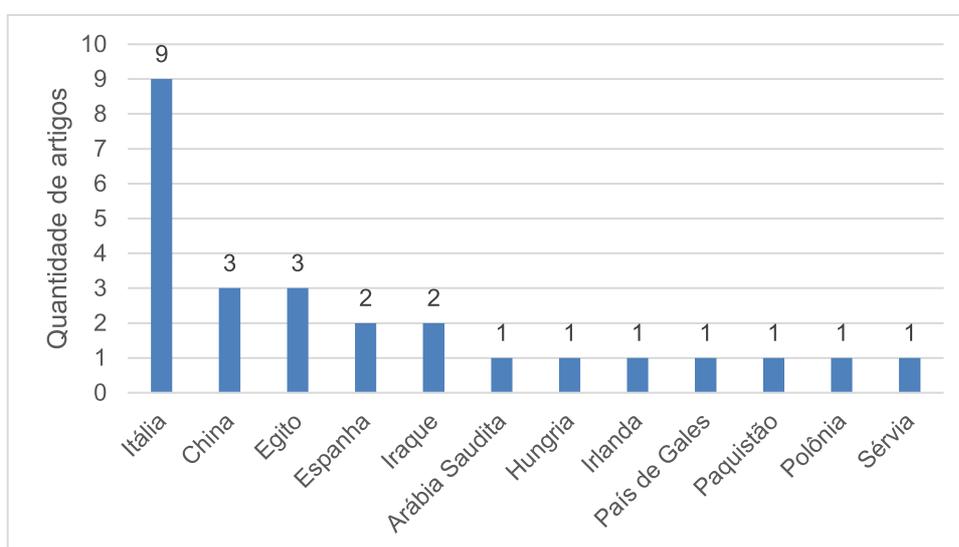
3.3 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Com o Portifólio Bibliográfico definido, foi realizada uma análise bibliométrica para identificar os autores mais influentes e relevantes para o campo de estudo, com base em suas contribuições e citações. Além disso, a análise buscou compreender como a produção científica se distribui geograficamente e quais são as palavras-chave mais frequentes em artigos científicos sobre a temática abordada.

A partir dos 22 artigos que compõem o Portifólio Bibliográfico, foram extraídos os países das instituições de pesquisa aos quais os autores estão afiliados. Observou-se que alguns artigos foram escritos por autores de uma mesma instituição de

pesquisa, outros por autores de diferentes instituições, porém localizadas no mesmo país, e ainda há artigos com autores de instituições de países distintos. O Gráfico 1 ilustra a participação de 12 países nos artigos selecionados, destacando-se a Itália, que possui o maior número de artigos sobre o tema investigado (9 artigos). Não é surpreendente que a Itália seja um país de referência em pesquisas relacionadas ao patrimônio histórico, dado que possui um vasto acervo edificado de longa data.

Gráfico 1 – Países das instituições de pesquisa dos autores do Portifólio Bibliográfico.

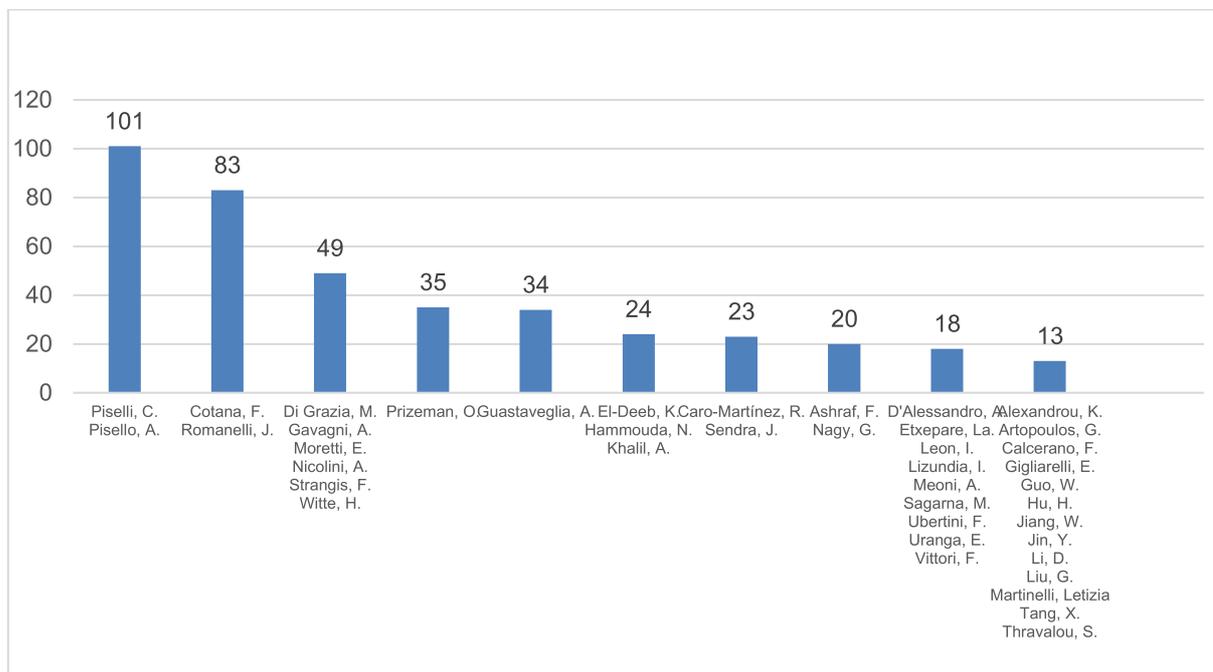


Fonte: A autora.

O Banco de Autores é composto por 41 pesquisadores. Dentre esses, duas autoras se destacam pelo número de citações de seus trabalhos: Cristina Piselli e Anna Laura Pisello. Ambas são afiliadas à Universidade de Perúgia, na Itália, e participaram, juntamente com outros autores, de três pesquisas que integram o Portifólio Bibliográfico. O Gráfico 2 apresenta todos os autores do Banco de Autores e a quantidade de vezes que seus trabalhos foram citados².

² * Citações verificadas no Google Acadêmico no dia 04 de junho de 2024.

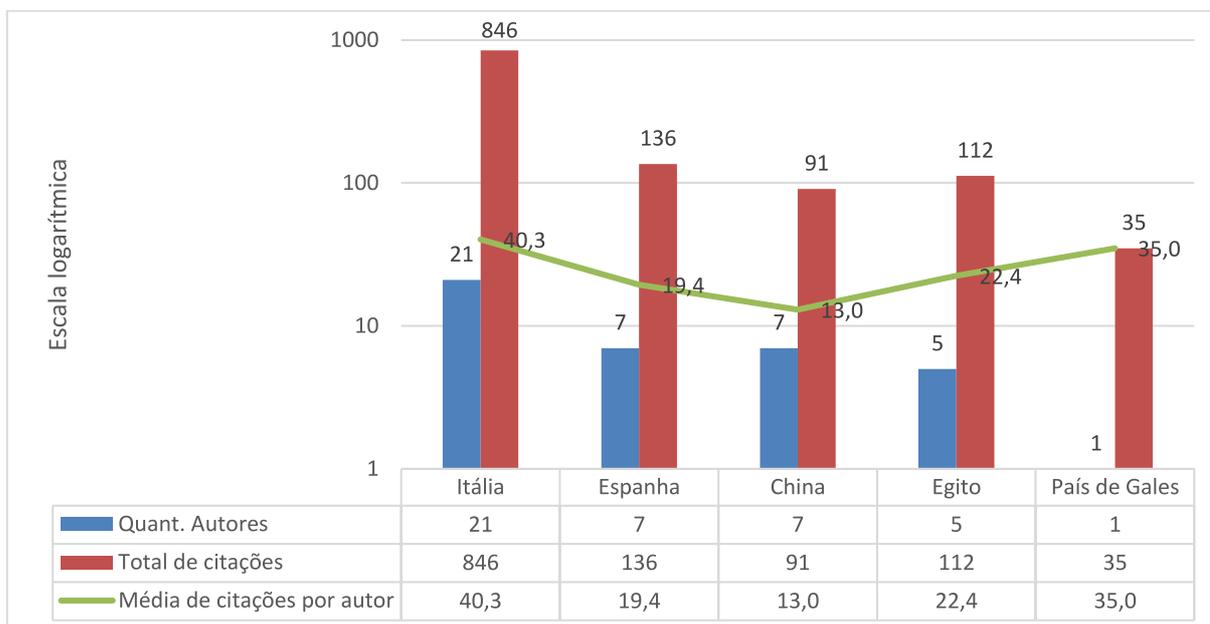
Gráfico 2 – Número de citações dos trabalhos dos autores que compõem o Banco de Autores.



Fonte: A autora.

Considerando apenas os artigos que compõem o Banco de Autores, o Gráfico 3 mostra a quantidade de autores por país (representada por barras azuis) e o total de citações que cada país obteve (representada por barras vermelhas). Com esses dados, é possível calcular a média de citações por autor (indicada pela linha verde). A partir dessa média, observa-se que a Itália é um país de destaque nessa área de pesquisa.

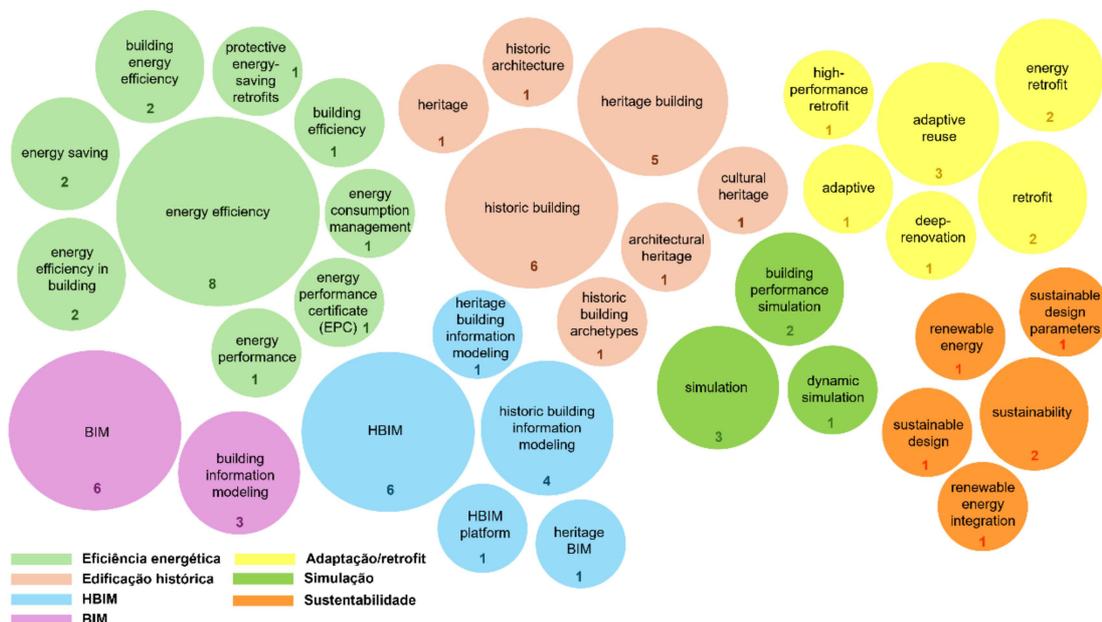
Gráfico 3 – Participação de cada país presente no Banco de Autores.



Fonte: A autora.

No que tange à análise das palavras-chave mais frequentes no Portifólio Bibliográfico, identificou-se a ocorrência de termos distribuídos em sete temas distintos. O Gráfico 4 é um gráfico de bolhas, elaborado a partir de dados compilados no *Software* Excel, onde as palavras-chave foram agrupadas por temas. Os números e o tamanho das bolhas representam a quantidade de vezes que cada palavra-chave apareceu. Destacam-se as seguintes palavras-chave: “*energy efficiency*”, com 8 ocorrências, e “*historic building*”, “BIM” e “HBIM”, cada uma com 6 ocorrências.

Gráfico 4 – Ocorrência de palavras-chave.



Fonte: A autora.

Ao analisar o gráfico, reitera-se a relevância dos artigos selecionados para esta Revisão Sistemática de Literatura, uma vez que os temas que mais se destacaram são os principais tópicos que serão discutidos e analisados nesta pesquisa: Eficiência Energética, Edificação Histórica e BIM/HBIM. A análise das palavras-chave indica tendências, lacunas e oportunidades de contribuição científica, reafirmando a importância deste trabalho.

3.4 ANÁLISE DOS ARTIGOS

O desafio de conciliar o valor patrimonial de um imóvel histórico com as necessidades de modernização energética tem sido alvo de pesquisas por diversos autores. O BIM aparece como uma abordagem promissora para essa demanda. A modelagem da informação da construção para edifícios históricos (HBIM), um processo de engenharia reversa, possibilita agregar ao modelo informações semânticas valiosas. Além disso, a modelagem energética da edificação (BEM) permite simular as necessidades reais da edificação e cenários hipotéticos de retrofit a partir das informações do HBIM.

Visando compreender os benefícios que a abordagem BIM pode trazer para a eficiência energética das edificações históricas, esta Revisão Sistemática da

Literatura (RSL) se propõe a compilar e analisar pesquisas selecionadas, sintetizando as principais abordagens, metodologias e descobertas de estudos recentes.

Piselli *et al.* (2020a), Piselli *et al.* (2020b) e Meoni *et al.* (2022) fazem parte do Projeto GEOFIT Horizon 2020, financiado pelo programa H2020 da União Europeia, que desenvolve e implanta sistemas geotérmicos aprimorados e econômicos, predominantemente para a modernização energética de edifícios, incluindo os históricos.

Os autores aplicaram a metodologia desenvolvida em um antigo estábulo, localizado em um complexo medieval na região de Perugia, na Itália Central. Piselli *et al.* (2020a) avaliam a viabilidade de implementar um sistema de bomba de calor geotérmica em edifícios históricos, visando substituir a caldeira a gás, considerada uma fonte de energia mais poluente. Para isso, uma simulação integrada utilizando HBIM e BEM foi realizada para avaliar se a instalação da bomba de calor geotérmica afetaria as restrições de proteção do imóvel e para comparar o desempenho energético do edifício com a bomba de calor geotérmica em relação ao cenário tradicional de aquecimento a gás natural.

Em outro estudo, Piselli *et al.* (2020b) exploram as possibilidades de gerenciamento de energia a partir do BIM, por meio da integração do modelo com sensores de temperatura e umidade do ar. A metodologia abrange o uso de HBIM, MEP (*Mechanical, Electrical, Plumbing* – Mecânica, Elétrica e Tubulações em português) e BEM para o controle operacional e a manutenção do edifício histórico (*facility management*) com base em dados reais monitorados. Foram avaliados os seguintes aspectos: necessidades energéticas (aquecimento, refrigeração, ventilação, iluminação, equipamentos); fontes de geração de energia (gás, eletricidade); parâmetros relacionados ao conforto interno e climáticos externos. Os dados coletados pelos sensores são alimentados em tempo real em uma plataforma *on-line* personalizada, que gerencia e integra todos os dados envolvidos no processo. Todos os registros de manutenção da edificação são feitos pelo proprietário ou mantenedor por meio de planilhas Excel. Uma programação externa ao BIM foi desenvolvida para integrar essas informações ao modelo.

Meoni *et al.* (2022) propõem agregar o monitoramento estrutural da edificação por meio da análise de sensores de vibração e criar um ambiente HBIM confiável e de fácil utilização, onde os próprios usuários do espaço possam intervir na plataforma para alterar dados de conforto térmico e de qualidade do ar. Para isso, sensores de

vibração e concentração de CO₂ foram instalados na edificação do estudo de caso. Um aplicativo complementar foi desenvolvido para o monitoramento contínuo dos dados dos sensores, que poderiam ser utilizados para o controle do conforto do ambiente pelos próprios utilizadores, graças a um sistema de gestão predial instalado no edifício que fornece dados em tempo real. Esses dados coletados foram comparados com parâmetros de conforto estabelecidos em normas e legislações italianas. Os dados de vibração serviram para o monitoramento da segurança estrutural, pois permitem identificar possíveis anomalias, como deslocamentos excessivos, fissuras ou degradação dos materiais, que podem comprometer a estabilidade da edificação ao longo do tempo.

Piselli *et al.* (2020a), Piselli *et al.* (2020b) e Meoni *et al.* (2022) destacam o potencial das aplicações de Gestão de Instalações (*Facility Management*) do HBIM para fornecer uma ferramenta de monitoramento do desempenho energético do edifício e do conforto interior.

As intervenções de reforma realizadas no antigo estábulo possibilitaram a certificação LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*) e GBC HB (*Green Building Council Historic Building*) para a restauração e requalificação sustentável de edifícios históricos. Foi o primeiro edifício no mundo a receber essa certificação, sendo premiado com a Certificação Ouro.

Esses três artigos apresentaram temas e abordagens que se complementavam. Já os demais artigos analisados nesta RSL são trabalhos únicos, desenvolvidos por pesquisadores diferentes. Embora apresentem estudos de caso distintos, alguns artigos têm abordagens muito similares, consistindo na modelagem HBIM de uma edificação histórica, incluindo o modelo energético (BEM). Essa modelagem evidencia as características básicas da edificação, e, posteriormente, são propostas intervenções hipotéticas de melhoria energética, simuladas no modelo BEM para investigar o potencial de economia de energia com as intervenções propostas.

Khalil, Hammouda e El-Deeb (2018) analisaram experiências de sucesso relatadas por outros autores na remodelação sustentável de edifícios históricos. Posteriormente, apresentaram um estudo de caso de uma edificação construída em meados do século XIX, em Alexandria, Egito. Foram propostas intervenções hipotéticas para alcançar maior eficiência energética, as quais foram simuladas para identificar o potencial de economia de energia.

Younis e Tawalbeh (2024) apresentaram uma abordagem similar ao trabalho de Khalil, Hammouda e El-Deeb (2018). O artigo descreve uma abordagem de simulação para avaliar a eficiência energética de um edifício histórico que funciona como pousada na Jordânia. Primeiramente, os autores desenvolveram o modelo HBIM da edificação e representaram em um modelo energético as características básicas da edificação. Posteriormente, três outros modelos energéticos foram desenvolvidos, aplicando-se três cenários, utilizando estratégias de intervenções passivas, ativas e de fontes de energias renováveis. As intervenções passivas referem-se a estratégias que melhoram o desempenho energético do edifício sem o uso de equipamentos mecânicos, como o uso de materiais de alto desempenho térmico, a ventilação natural e o sombreamento para reduzir a carga térmica. Já as intervenções ativas envolvem a adoção de sistemas tecnológicos e mecânicos para otimizar o consumo energético, como a implementação de sistemas de climatização mais eficientes e automação para controle de temperatura e ventilação. A viabilidade econômica não foi testada, sendo recomendada pelos autores para futuros trabalhos.

Curto *et al.* (2023) também apresentaram uma abordagem similar, desenvolvendo uma modelagem BIM para analisar uma edificação histórica em Palermo, Itália. O objetivo foi demonstrar como é possível alcançar uma redução no consumo de energia e preservar a historicidade do edifício. Para quantificar a economia de energia operacional, foi realizada uma inspeção no edifício e uma avaliação de seu consumo. Testes de condutância térmica foram realizados nas paredes do edifício e os dados foram extraídos e importados para o modelo BEM. Após a análise, que também foi apoiada em uma pesquisa histórica aprofundada, foi possível identificar as áreas de intervenção sobre as quais atuar. As intervenções dizem respeito a tecnologias passivas, como isolamentos na envoltória do edifício, e a tecnologias ativas, como a substituição de sistemas de aquecimento.

Na mesma linha de pesquisa, Alsaid *et al.* (2023) apresentaram um estudo de análise energética em uma edificação histórica localizada no Egito. O desempenho energético e o conforto térmico da edificação foram avaliados e, a partir dessa análise, foi investigado o potencial de economia de energia para duas possibilidades de intervenção. Assim como no trabalho de Younis e Tawalbeh (2024), Alsaid *et al.* (2023) desenvolveram o modelo HBIM da edificação e, em seguida, realizaram três simulações energéticas: uma representando o estado atual do edifício e outras duas com cenários distintos de intervenções. As simulações executadas mostraram

diversos cenários, possibilitando a escolha de acordo com as condições da edificação e o nível econômico exigido. A metodologia apresentada por Alsaid *et al.* (2023) mostrou-se a mais completa e didática dentre todos os trabalhos analisados que seguiam essa abordagem.

Mudando o foco da abordagem, Caro-Martínez e Sendra (2018) apresentaram uma modelagem energética urbana (UBEM – *Urban Building Energy Modeling*) voltada para bairros históricos. A UBEM consiste na simulação do desempenho energético de múltiplos edifícios em uma determinada área, permitindo avaliar o impacto de diferentes estratégias de eficiência energética em escala urbana. Os autores criaram um parâmetro para classificar os blocos de edifícios de acordo com o nível de proteção histórica, possibilitando o mapeamento urbano desse nível de proteção das edificações. Após o mapeamento, selecionaram um bloco de amostra representativo para fazer a análise energética através de um modelo BEM.

O intuito de Caro-Martínez e Sendra (2018) é apresentar um método alternativo que possa ser representativo para bairros históricos morfologicamente homogêneos, uma vez que é inviável a análise energética de todas as edificações históricas. Para testar o método proposto, os autores realizaram a modelagem energética, o monitoramento do comportamento térmico e a simulação de medidas de melhorias em cinco habitações, no conjunto histórico de Sevilha, Espanha. Os estudos de caso mostraram que todas as edificações simuladas precisariam alterar a fonte de energia para uma renovável para alcançar a eficiência energética.

O trabalho de Caro-Martínez e Sendra (2018) traz uma abordagem metodológica de análise de eficiência energética de um conjunto urbano histórico a partir de uma amostragem de edificações. Contudo, não aprofunda a metodologia utilizada para a simulação energética das edificações individualmente, apenas menciona a modelagem energética, sem oferecer detalhes suficientes.

Cinquelpalmi *et al.* (2023) apresentam uma metodologia voltada para a reabilitação do parque imobiliário existente na Itália, analisando a possibilidade de conversão de edifícios históricos, originalmente não projetados para uso residencial, em prédios habitacionais. Muitos países europeus possuem uma grande quantidade de imóveis históricos sem uso, abandonados ou fechados, e, ao mesmo tempo, enfrentam uma alta demanda por moradias. A abordagem dos autores, além de sustentável, soluciona ambos os problemas. A metodologia proposta é baseada em duas fases principais: a definição de parâmetros para avaliar o potencial de reuso de

um edifício e a integração do sistema de avaliação em um ambiente BIM e GIS (*Geographic Information System*). Essa abordagem foi testada em um estudo de caso.

Segundo os autores, o principal desafio é identificar as formas mais adequadas de alterar o uso original de um edifício, estender sua vida útil e adaptar o espaço interno às novas exigências de habitação, que demandam maior flexibilidade. Para automatizar o processo de verificação preliminar da viabilidade de reutilização adaptativa, Cinquepalmi *et al.* (2023) desenvolveram a modelagem do edifício do estudo de caso em ambiente BIM e, posteriormente, criaram um método de verificação automática de parâmetros, utilizando programação específica para esse fim.

A integração do GIS é proposta como uma forma de fomentar a catalogação e classificação de edifícios abandonados e em decadência, com base em seu potencial de conversão para uso residencial. Isso oferece suporte ao planejamento de intervenções de reutilização adaptativa, promovendo a transição gradual do setor de construção para um sistema de economia circular (Cinquepalmi *et al.*, 2023).

A principal limitação para a aplicação em larga escala da metodologia de avaliação proposta pelos autores está relacionada à ainda limitada difusão da tecnologia digital no setor da construção, conforme apontado pelos autores.

Cinquepalmi *et al.* (2023) recomendam, para trabalhos futuros, o desenvolvimento de uma ferramenta BIM e GIS capaz de identificar automaticamente as intervenções necessárias para que uma edificação histórica se torne energeticamente eficiente, de acordo com as condições ambientais, como vento, radiação solar, temperatura, precipitação e umidade relativa. A ferramenta também poderia ser integrada com os parâmetros fornecidos pelos regulamentos municipais de construção, que regem os métodos de construção, para identificar possíveis intervenções de reutilização adaptativa.

De modo geral, Cinquepalmi *et al.* (2023) sugerem o uso do BIM para simular a condição atual da edificação histórica, realizar uma auditoria energética e, a partir disso, propor melhorias simuladas conforme as restrições de proteção do imóvel.

Alguns autores apresentaram estudos de caso que utilizaram sensores que, integrados a sistemas de armazenagem de dados, possibilitam simulações mais precisas.

Assim como Piselli *et al.* (2020a, 2020b) e Meoni *et al.* (2022), Nagy e Ashraf (2021) também desenvolveram uma plataforma *on-line* externa ao modelo BIM para gerenciar dados de sensores instalados na edificação do estudo de caso. O objetivo

da plataforma digital dos autores era monitorar o desempenho energético do edifício histórico utilizando *Big Data* e detecção inteligente por sensores. Os dados dos sensores foram exportados em tempo real para a plataforma *on-line* e integrados ao modelo HBIM. A plataforma foi criada para evitar problemas de interoperabilidade entre os *softwares* BIM e BEM utilizados, mantendo todas as informações disponíveis em um único local. Além de servir como um arquivo de dados históricos, a plataforma digital monitora e analisa continuamente quaisquer dados ambientais.

Outro estudo que propôs a criação de uma plataforma *on-line* externa para integrar dados foi o de Etxepare *et al.* (2020). Os autores apresentaram um protocolo para a reabilitação de fachadas ornamentadas de edifícios históricos, com simulações de soluções ativas e passivas para melhorar a eficiência energética da edificação. A metodologia inclui a captura da geometria em 3D (digitalização a *laser* e fotogrametria automatizada por *drone*), a criação de um modelo HBIM, o monitoramento por sensores, ensaios não destrutivos (termografia infravermelha), a fabricação avançada de peças (impressão 3D de componentes de isolamento) e as simulações de soluções ativas e passivas.

O desempenho da edificação do estudo de caso de Etxepare *et al.* (2020) foi monitorado com instrumentos de medição integrados a modelos digitais BIM. Após a análise das soluções, foram selecionados dois cenários de medidas passivas com melhor relação custo-eficácia e maior economia de energia. Sensores posicionados na edificação também foram integrados ao modelo BIM. Os dados de monitoramento são acessíveis em tempo real via navegador *web* e compilados em uma plataforma de gestão, com atualizações a cada 15 minutos.

Visando agregar fontes de energia renováveis a edificações históricas, Lucchi e Agliata (2023) propõem avaliar no modelo HBIM a possibilidade de integração de sistemas fotovoltaicos em edifícios históricos, seguindo um esquema de análise de risco-benefício. No estudo de caso realizado no Palazzo della Cultura, no centro histórico de Marcianise, Itália, os autores realizaram o levantamento *in loco* e desenvolveram o modelo HBIM. Após analisarem as restrições patrimoniais, selecionaram intervenções e componentes fotovoltaicos compatíveis. Os componentes foram modelados em LOD 500, ou seja, nível *as built*. Lucchi e Agliata (2023) relataram dificuldades na modelagem precisa de elementos patrimoniais, especialmente ao lidar com níveis elevados de detalhamento. Essa dificuldade

também foi observada na modelagem dos módulos fotovoltaicos devido às numerosas camadas e à presença de peças elétricas.

Massafra *et al.* (2023) propõem um método digital integrado de sistemas de suporte à decisão para auxiliar no gerenciamento de edificações pelos diversos *stakeholders* envolvidos no processo, facilitando a tomada de decisões nas adaptações de edifícios históricos obsoletos para novos usos. A intenção dos autores é permitir a operação baseada no desempenho energético de edifícios existentes, criando um ambiente de informações capaz de compartilhar conhecimento sobre o desempenho energético e relacioná-lo às informações sobre as condições de ocupação planejadas.

O estudo de caso de Massafra *et al.* (2023) foi realizado em uma edificação histórica em Bolonha, Itália. Os autores optaram por simular apenas os cômodos utilizados como salas de aula. Massafra *et al.* (2023) coletaram informações sobre a ocupação do edifício, como o número de usuários, funções e uso do espaço, e combinaram esses dados com informações sobre o desempenho do edifício (energia de aquecimento e necessidade de eletricidade). As salas de aula foram analisadas quanto ao consumo energético, operando sob diferentes condições de ocupação.

Ao sistematizar dados BIM e BEM em um ambiente de informações acessível à equipe de operações de construção, as informações armazenadas nos modelos puderam ser inspecionadas para melhor compreender o desempenho termo energético da construção e dar suporte aos processos de tomada de decisão (Massafra *et al.*, 2023).

Calcerano *et al.* (2024) apresentaram um fluxo de trabalho baseado em BIM e em ferramentas computacionais para modelar e analisar o desempenho termo higrométrico de alguns edifícios. Esse fluxo de trabalho foi aplicado em nove edificações históricas públicas, em sete países diferentes, oferecendo uma visão geral dos climas, tipologias e funções dos edifícios. Foram realizadas simulações termo higrométricas dinâmicas por meio da modelagem computacional do comportamento térmico e da umidade relativa do ar de cada edifício ao longo do tempo, considerando variações sazonais, climáticas e operacionais. As simulações seguiram o fluxo de trabalho proposto, baseado na estrutura de auditoria energética estabelecida pela regulamentação internacional EN 16247-2 (2014). No geral, o fluxo de trabalho mostrou-se bem-sucedido entre profissionais com competências distintas (especialistas em conservação, eficiência energética e processos digitais) em um

contexto legislativo e climático diversificado como o Mediterrâneo, revelando-se flexível, holístico e escalável para o setor do patrimônio construído.

Dentre os artigos analisados, destaca-se o estudo de Zhang *et al.* (2023), que aborda a qualidade do ar interior com foco na preservação da edificação histórica, em vez do conforto dos usuários. Fatores como temperaturas extremas, umidade excessiva e a presença de poluentes podem comprometer a integridade da edificação e de seus acabamentos (Zhang *et al.*, 2023). Diante desse cenário, os autores desenvolveram um sistema de gerenciamento da qualidade do ar interno, integrando a tecnologia de gêmeos digitais e sensores instalados na edificação do estudo de caso, buscando otimizar o consumo energético. O principal desafio foi propor intervenções que garantissem a conservação dos valores patrimoniais sem comprometer a eficiência energética.

No estudo de caso de Zhang *et al.* (2023), realizado na antiga sede da Polícia Marítima de Hong Kong, foram simulados três cenários: (i) a relação entre a taxa de troca de ar (interior/exterior) e múltiplos parâmetros de qualidade do ar interna, (ii) a relação entre a taxa de troca de ar (interior/exterior) e o consumo de energia, e (iii) a configuração ideal de troca de ar com melhor qualidade do ar interna e eficiência energética para preservação de edifícios patrimoniais. Os resultados mostraram que a estratégia ideal de controle do sistema de ventilação alcançou até 30% de economia de energia no estudo de caso. O sistema de controle adaptativo de Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado (AVAC) multi-indicador proposto contribuiu significativamente para a redução de múltiplos poluentes atmosféricos; ajustes de parâmetros de qualidade do ar interno para a preservação de edifícios patrimoniais com impactos estruturais e visuais mínimos; e a necessidade de sistemas de climatização mais autônomos e energeticamente eficientes. Diferente de outras pesquisas, a colocação dos sensores ocorreu após simulação de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para escolha do melhor local para instalação.

Wang *et al.* (2024), com o objetivo de melhorar a eficiência energética de residências históricas chinesas, propõem uma metodologia de controle inteligente de energia baseada na localização dos ocupantes da casa, utilizando monitoramento via *Bluetooth* e algoritmos inteligentes que preveem a localização dos moradores por meio dos *smartphones*. Um modelo BIM é empregado no gerenciamento de energia e na análise espacial. Ao utilizar o sistema de posicionamento de ocupantes proposto para rastrear padrões de ocupação, o sistema desenvolvido ajusta automaticamente

o funcionamento da iluminação, ar-condicionado, aquecimento e outros sistemas, alinhando-os com as condições de ocupação em tempo real.

Com uma melhor compreensão do comportamento dos usuários, os autores indicam que é possível controlar com precisão e racionalidade o uso de energia. Isso foi demonstrado nos resultados apresentados após a análise do estudo de caso, onde, ao comparar o consumo diário de energia, a abordagem convencional, sem mecanismos de controle, levou a um uso substancialmente maior de energia. Em contraste, a estratégia de controle centrada nos ocupantes reduziu significativamente o consumo de energia sem comprometer os níveis de conforto (Wang *et al.*, 2024).

Um ponto a ser observado no trabalho de Wang *et al.* (2024) é que os autores desconsideram os períodos em que os ocupantes do espaço não estão portando seus *smartphones*, o que resulta na falta de dados de localização, afetando a precisão do posicionamento. Além disso, os autores não apresentam nenhum estudo sobre a quantidade de tempo que as pessoas passam com os *smartphones*.

Os demais artigos que compõem o banco de artigos não apresentam informações suficientemente relevantes para os objetivos desta dissertação. Alguns apresentam lacunas no que se refere à temática da eficiência energética (Prizeman, 2015; Bevilacqua *et al.*, 2023), enquanto outros não aprofundam na metodologia utilizada ou não abordam o uso do BIM em relação às particularidades históricas da edificação do estudo de caso (Jiang *et al.*, 2022; Pochwala *et al.*, 2023; Abdullah e Hatem, 2023a, 2023b).

O Quadro 6 apresenta o resumo das intervenções práticas dos artigos mais relevantes para essa dissertação.

Quadro 6 – Resumo das intervenções práticas dos artigos relevantes.

Artigo	Intervenções práticas	
Piselli <i>et al.</i> (2020a)	Mesmo estudo de caso	Avaliação da substituição da energia proveniente da caldeira a gás por bomba de calor geotérmica em um estábulo medieval, usando HBIM e BEM para analisar impacto na proteção do imóvel e desempenho energético.
Piselli <i>et al.</i> (2020b)		Integração de sensores ao modelo HBIM para gerenciamento energético do estábulo.
Meoni <i>et al.</i> (2022)		Monitoramento estrutural do estábulo com sensores de vibração e sistema HBIM interativo para usuários ajustarem conforto térmico e qualidade do ar, integrado ao controle automático dos equipamentos da edificação.
Khalil, Hammouda e El-Deeb (2018)	Modelagem HBIM e simulação BEM de um edifício histórico no Egito para testar intervenções visando eficiência energética.	
Younis e Tawalbeh (2024)	Modelagem HBIM e simulação BEM de um edifício histórico na Jordânia, comparando cenários com intervenções passivas, ativas e alterando a fonte de energia para uma renovável.	
Curto <i>et al.</i> (2023)	Modelagem HBIM de um edifício histórico na Itália, avaliação real de consumo energético e testes de condutância térmica, exportados para BEM para propor intervenções passivas e ativas.	
Alsaid <i>et al.</i> (2023)	Análise do desempenho energético e conforto térmico de um edifício histórico no Egito, investigando o potencial de economia de energia para duas intervenções.	
Caro-Martínez e Sendra (2018)	Análise energética das edificações do conjunto urbano histórico de Sevilha, na Espanha, a partir da amostragem de cinco habitações. A metodologia é aplicável a bairros históricos morfologicamente homogêneos.	
Cinquelpalmi <i>et al.</i> (2023)	Desenvolveram parâmetros para avaliar o potencial de reuso de edifícios históricos para uso residencial (imóveis que, originalmente, não foram projetos para moradia). Criaram um método automatizado de verificação dos parâmetros com programação específica e integraram esse sistema ao BIM e GIS para catalogação de edifícios abandonados com potencial para moradia.	
Nagy e Ashraf (2021)	Desenvolveram plataforma digital para integrar os dados de sensores que foram instalados em uma edificação histórica ao HBIM, permitindo assim o monitoramento em tempo real do desempenho energético do edifício. A plataforma digital foi um meio de resolver os problemas de interoperabilidade entre BIM e BEM.	
Etxepare <i>et al.</i> (2020)	Desenvolveram um protocolo para reabilitação de fachadas ornamentadas de edifícios históricos, visando melhorias de eficiência energética. O protocolo incluía a captura da geometria da fachada em 3D com <i>drones</i> , HBIM, ensaios não destrutíveis, o monitoramento por sensores de temperatura, simulação energética (BEM), a fabricação de peças de isolamento térmico por impressão 3D e monitoramento contínuo em uma plataforma de gestão.	

Lucchi e Agliata (2023)	Avaliação da integração de sistemas fotovoltaicos em um edifício histórico na Itália, baseada em HBIM e análise de risco-benefício via BEM.
Massafra <i>et al.</i> (2023)	Método digital integrado para sistematizar dados BIM e BEM, facilitando decisões sobre adaptações energéticas de edifícios históricos para qualquer pessoa envolvida no processo de adaptação da edificação.
Calcerano <i>et al.</i> (2024)	Análise energética de edifícios históricos em sete países (para ter percepção abrangente de diferentes climas e tipologias de edifícios históricos), desenvolvendo fluxo de trabalho BIM e BEM baseado na estrutura de auditoria energética da norma EN 16247-2: 2014.
Zhang <i>et al.</i> (2023)	Desenvolveram um sistema de gestão da qualidade do ar com gêmeos digitais e sensores, priorizando a preservação da estrutura da edificação histórica e a otimização do consumo energético, com menor foco no conforto do usuário.
Wang <i>et al.</i> (2024)	Estudo de caso em uma edificação histórica chinesa. Propõe controle inteligente de energia via monitoramento Bluetooth, por meio dos <i>smartphones</i> , prevendo a localização dos ocupantes para ajustar automaticamente iluminação, climatização e outros sistemas. Os dados são integrados em tempo real ao BIM e BEM para análises energéticas e ajustes automatizados.

Fonte: A autora.

3.4.1 Relato sobre o uso de *softwares*

Como a maioria dos artigos analisados menciona o uso de diferentes *softwares*, tornou-se relevante dedicar uma seção específica para sua análise.

Os *softwares* têm se tornado cada vez mais indispensáveis nas áreas de Arquitetura e Engenharia, sendo utilizados tanto em projetos em fase de concepção quanto em construções já existentes que requerem modificações através de análises de viabilidade. A simulação, que consiste na reprodução do funcionamento de um processo por meio de outro, auxilia na tomada de decisões, especialmente em edificações históricas, onde a avaliação cuidadosa do risco-benefício é essencial.

O processo de computação associado à instrumentação para edificações pode ser organizado em três grupos de atividades: construção do modelo (modelagem), execução da simulação computacional e análise de dados. A análise e interpretação dos resultados exigem um conhecimento profundo das duas etapas anteriores.

Em todos os artigos analisados, apenas dois não especificaram quais *softwares* foram utilizados nos estudos de caso: Bevilacqua *et al.* (2023) e Nagy e Ashraf (2021).

Estes últimos relataram apenas a criação de uma plataforma *web* para gerenciar o HBIM.

No desenvolvimento do modelo de arquitetura histórica (HBIM), observou-se uma preferência pelo *software* Autodesk Revit, utilizado na modelagem das edificações em 15 dos estudos de caso. O *software* DesignBuilder foi empregado em sete trabalhos: Piselli (2020a e 2020b) o utilizou na modelagem AVAC (aquecimento, ventilação e ar-condicionado); Khalil, Hammouda e El-Deeb (2018) o aplicaram ao HBIM e às modelagens AVAC e MEP; Caro-Martínez e Sendra (2018) também o utilizaram para HBIM, modelagem energética e simulação térmica das cinco edificações estudadas; e Etxepare (2020), Calcerano *et al.* (2024) e Younis e Tawalbeh (2024) o mencionaram em simulações energéticas. Esse *software* permite a construção de um modelo novo diretamente na sua interface ou a importação de um modelo BIM para a execução de simulações relacionadas à energia e conforto térmico, AVAC, iluminação natural, custo, entre outras funcionalidades.

Para a simulação energética, o *software* mais citado pelos autores foi o EnergyPlus, uma ferramenta gratuita, de código aberto e multiplataforma, utilizada em oito dos 22 artigos pesquisados. De acordo com Khalil, Hammouda e El-Deeb (2018), o DesignBuilder, utilizado na modelagem, e o EnergyPlus, empregado na simulação energética, demonstraram ser excelentes ferramentas para prever o comportamento do edifício e avaliar diferentes soluções em termos de consumo de energia, conforto térmico e visual, além do potencial de energia renovável, o que é altamente vantajoso para edificações históricas que não permitem alterações desnecessárias e intervenções invasivas.

O gerenciamento de dados e informações provenientes de diferentes *softwares* ainda constitui um grande desafio. Alguns autores mencionaram a necessidade de desenvolver programações para facilitar esse processo. Cinquepalmi *et al.* (2023) destacam que o Dynamo tem se mostrado uma ferramenta útil para o desenvolvimento de algoritmos capazes de extrair informações de modelos BIM e realizar análises automáticas. Piselli *et al.* (2020b) e Etxepare *et al.* (2020) também relataram a necessidade de criar programações específicas para a extração de dados, utilizando o Dynamo para esse fim. A linguagem Python, amplamente utilizada em aplicações *web*, desenvolvimento de *software*, ciência de dados e aprendizado de máquina, foi empregada por alguns autores (Piselli *et al.*, Meoni *et al.*, Cinquepalmi *et al.*, Massafra *et al.*) frequentemente em combinação com o Dynamo.

Diversos outros programas foram mencionados pelos autores para variadas funcionalidades, como programas específicos para nuvens de pontos, modelagem arquitetônica, modelagem AVAC, modelagem MEP (Mecânica, Elétrica e Hidráulica), modelagem de iluminação, simulação energética, simulação térmica, mapeamento geográfico, gerenciamento de vias, programação e gerenciamento de dados. A compilação dessas informações encontra-se ao final da dissertação, no Apêndice A.

Em muitos estudos, observou-se o uso combinado de vários *softwares*. Em algumas situações, o compartilhamento de dados entre programas ocorre sem grandes problemas, mas, frequentemente, surgem incompatibilidades de linguagem entre eles, exigindo o desenvolvimento de programações específicas para criar plataformas que auxiliem no gerenciamento desses dados. Isso foi relatado por Piselli *et al.* (2020b), Meoni *et al.* (2022), Etxepare *et al.* (2020), Cinquepalmi *et al.* (2023) e Massafra *et al.* (2023).

3.4.2 Desafios e soluções relatados pelos autores para análise da eficiência energética em HBIM

A aplicação do BIM na eficiência energética de edificações históricas enfrenta desafios significativos, especialmente no que se refere à interoperabilidade entre diferentes *softwares*, à modelagem de componentes históricos e à complexidade dos fluxos de trabalho. Estudos recentes têm buscado soluções para mitigar essas dificuldades, explorando abordagens semiautomáticas, desenvolvendo plataformas externas ao modelo BIM e integrando profissionais de Tecnologia da Informação (TI) às equipes multidisciplinares.

A interoperabilidade é um dos principais entraves na modelagem energética de edificações históricas. Massafra *et al.* (2023) relataram dificuldades na integração de dados entre BIM e o *software* de simulação energética EnergyPlus. Para contornar esse problema, os autores recorreram ao uso do Topologic (gbXML) e a algoritmos de programação visual no Grasshopper, possibilitando a comunicação entre Autodesk Revit e EnergyPlus via Rhino/Inside/Revit e a biblioteca Ladybug Tools. No entanto, a troca de dados não ocorreu de forma plenamente bidirecional, levando à necessidade de um modelo digital BEM separado. Esse processo não é o ideal e pode resultar em perda de informações, duplicação de dados e ocorrência de erros.

Problemas de interoperabilidade são amplamente documentados na literatura. Kamel e Memari (2019) destacam que a ferramenta BIM pode não transferir todas as informações de um modelo, que os arquivos BIM podem não armazenar adequadamente os dados necessários e que as ferramentas de simulação energética podem não conseguir ler corretamente as informações do BIM. Esses desafios, frequentemente, demandam abordagens semiautomáticas, como a descrita por Calcerano *et al.* (2024), que evidenciaram a necessidade de profissionais de tecnologia da informação na equipe de trabalho para garantir a correta integração de fluxos de dados. Muitos estudos analisados propuseram plataformas externas ao modelo BIM para contornar essas limitações. Nagy e Ashraf (2021), por exemplo, desenvolveram uma plataforma baseada na *web* para gerenciar o HBIM, enquanto Piselli *et al.* (2020a), Piselli *et al.* (2020b) e Meoni *et al.* (2022) recorreram a plataformas externas para o gerenciamento de dados de sensores. Por outro lado, Cinquepalmi *et al.* (2023) relataram que todos os programas utilizados em sua pesquisa interagiram satisfatoriamente, sem críticas à interoperabilidade.

Além da interoperabilidade, a modelagem de edificações históricas apresenta desafios particulares. A ausência de bibliotecas padronizadas para componentes históricos dificulta a representação fidedigna das construções, exigindo a criação de objetos específicos que demandam elevado detalhamento. Lucchi e Agliata (2023) relataram dificuldades na modelagem de módulos fotovoltaicos devido à complexidade das diversas camadas e à presença de componentes elétricos. A escolha entre um alto nível de detalhamento e uma modelagem mais simplificada impacta diretamente a qualidade das análises patrimoniais e energéticas.

O nível de detalhamento dos modelos BIM varia conforme os objetivos dos estudos. Lucchi e Agliata (2023) adotaram um alto nível de detalhe (*as-built*) para garantir análises precisas, enquanto Cinquepalmi *et al.* (2023) e Massafra *et al.* (2023) optaram por níveis mais baixos (LOD 300 e LOD 200, respectivamente), adequados às necessidades específicas de cada pesquisa. A definição do nível de informação depende do equilíbrio entre fidelidade geométrica e eficiência computacional, especialmente quando o foco está na simulação energética.

O Quadro 7 apresenta o resumo das dificuldades relatadas por alguns autores e quais soluções foram adotadas para contornar essas adversidades.

Quadro 7 – Resumo de relatos de dificuldades e soluções adotadas.

Autores	Desafios	Soluções
Massafra <i>et al.</i> (2023)	Interoperabilidade	Uso do Topologic (gbXML) e algoritmos de programação visual no Grasshopper, possibilitando a comunicação entre Autodesk Revit e EnergyPlus via Rhino/Inside/Revit e a biblioteca Ladybug Tools. Desenvolvimento de BEM fora do fluxo BIM.
Calcerano <i>et al.</i> (2024)		profissionais de TI na equipe de trabalho para garantir a correta integração de fluxos de dados.
Nagy e Ashraf (2021)		Desenvolvimento de uma plataforma baseada na <i>web</i> para gerenciar o HBIM.
Piselli <i>et al.</i> (2020a)		Uso de plataformas externas para o gerenciamento de dados de sensores.
Piselli <i>et al.</i> (2020b)		
Meoni <i>et al.</i> (2022)		
Lucchi e Agliata (2023)	Dificuldade na modelagem de elementos complexos	Optaram por modelar em alto nível de detalhe. A dificuldade não impossibilitou a modelagem, apenas foi gasto muito tempo.
Cinquelpalmi <i>et al.</i> (2023)		Optaram por simplificar a modelagem.
Massafra <i>et al.</i> (2023)		

Fonte: A autora.

Apesar das dificuldades, o BIM apresenta grande potencial para aprimorar a eficiência energética de edificações históricas. A principal vantagem reside na possibilidade de realizar simulações detalhadas, permitindo testar diferentes estratégias antes da implementação física. Isso minimiza riscos e assegura a integridade do patrimônio. A integração de sensores em tempo real aprimora a precisão das análises, tornando-as mais alinhadas às condições reais da edificação. Tecnologias como *drones* e *scanners a laser* possibilitam a geração de nuvens de pontos detalhadas, viabilizando modelos digitais altamente fiéis. Além disso, ferramentas de análise estrutural permitem inspeções não destrutivas, ampliando as possibilidades de intervenção segura e eficaz (Meoni *et al.*, 2022).

A centralização de informações no modelo BIM favorece a tomada de decisões ao integrar registros históricos, dados de manutenção e consumo energético. As dimensões 6D e 7D, que abordam sustentabilidade e operação ao longo do ciclo de

vida da edificação, desempenham um papel fundamental na implementação de reformas energéticas eficientes. A compilação dos estudos indica que o sucesso de projetos BIM aplicados a edificações históricas está diretamente relacionado à composição da equipe envolvida e aos recursos financeiros disponíveis. Pesquisas que contaram com financiamento e participação de especialistas em TI alcançaram maior sofisticação nas análises, enquanto estudos com menos recursos recorreram a abordagens mais simplificadas.

A adaptação das ferramentas digitais ao setor de conservação histórica representa um desafio e uma oportunidade para aprimorar práticas de preservação. A abordagem multidimensional proporcionada pelo BIM permite integrar conservação patrimonial, sustentabilidade, funcionalidade e eficiência energética, garantindo que edificações históricas atendam às demandas contemporâneas sem comprometer sua essência.

3.4.3 Considerações finais sobre a RSL

A partir da revisão sistemática da literatura, ficou evidente o potencial do BIM na análise da eficiência energética de edificações históricas. Nos estudos de caso disponíveis nos artigos da RSL, foi possível realizar análises mais detalhadas devido à disponibilidade de equipes multidisciplinares e ao suporte financeiro substancial. Esse cenário permitiu a utilização de tecnologias avançadas, como sensores integrados às edificações e sua conexão com os programas BIM, além da resolução de problemas de integração de dados e interoperabilidade entre os *softwares* por meio de programações desenvolvidas para tal. O nível de aprofundamento dos estudos é, portanto, facilitado pela presença de muitos profissionais especializados e pelos recursos financeiros disponíveis.

Desta forma, para alcançar o objetivo do presente trabalho, que é compreender como o HBIM e o BEM podem auxiliar na análise da eficiência energética de envoltórias de edificações históricas, mostra-se necessário investigar de forma aprofundada os desafios que surgem durante o processo de modelagem histórica e os problemas de interoperabilidade entre os *softwares* utilizados.

Sendo assim, a RSL desempenha dois papéis fundamentais nesta pesquisa. Primeiramente, ela orienta o delineamento metodológico do estudo de caso, ao identificar os principais *softwares*, estratégias e entraves envolvidos na integração

entre HBIM e BEM, particularmente em relação à modelagem da envoltória das edificações e à interoperabilidade entre Revit e Energy Plus. A escolha desses dois *softwares*, por exemplo, foi diretamente influenciada pela recorrência e relevância observadas nos trabalhos revisados. Além disso, a RSL forneceu subsídios para decisões sobre o nível de informação necessário nos modelos e os critérios de análise da eficiência energética. Em segundo lugar, a RSL também servirá como base comparativa para a análise dos resultados obtidos no estudo de caso. Ao final da aplicação prática, os achados relacionados aos desafios enfrentados, ao nível de precisão das simulações e às limitações impostas pela realidade local serão comparados às soluções e estratégias identificadas nos estudos internacionais. Essa comparação permitirá refletir sobre a transferibilidade das boas práticas observadas na literatura para contextos distintos, como o brasileiro, marcado por limitações técnicas, climáticas e orçamentárias específicas.

O estudo de caso será conduzido na Escola de Arquitetura e Urbanismo da UFMG (EA-UFMG), localizada em Belo Horizonte, Minas Gerais, uma edificação modernista tombada, que possui etiquetagem ENCE parcial, com classificação B para o sistema de iluminação e C para a envoltória. Devido ao tamanho e complexidade do edifício, o foco recairá sobre o bloco do projeto original, denominado “Bloco L”, cuja envoltória será analisada. Essa escolha se justifica tanto pela importância da envoltória no desempenho térmico quanto pelos desafios que sua modelagem pode representar na interoperabilidade entre HBIM e BEM.

A simulação será realizada no Energy Plus a partir de um modelo HBIM desenvolvido no Revit. Será avaliada a viabilidade desse processo em um contexto de equipe reduzida e recursos limitados, contrastando-o com os estudos de caso da literatura, que, em geral, operam em cenários mais favoráveis. Caso a simulação não seja viável ou apresente limitações significativas, essas dificuldades serão documentadas como parte dos resultados, contribuindo para o entendimento das barreiras práticas à adoção dessas ferramentas no contexto brasileiro.

Adicionalmente, o clima da região e a geometria da EA-UFMG apresentam características distintas em relação aos edifícios analisados nos estudos europeus presentes na RSL. A realização do estudo em um contexto climático tropical e em uma edificação modernista permite uma análise comparativa relevante, contribuindo para a ampliação do conhecimento sobre a aplicabilidade do HBIM-BEM em diferentes realidades.

Assim, a RSL não apenas fundamenta e direciona o planejamento do estudo de caso, mas também será utilizada como referência para interpretar criticamente os resultados obtidos, promovendo uma reflexão sobre a adequação e as limitações das práticas e metodologias atualmente adotadas na análise da eficiência energética de edificações históricas.

4 ESTUDO DE CASO – ESCOLA DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UFMG

O edifício do estudo de caso desta pesquisa é o prédio da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais (EA-UFMG). A escolha desta edificação se baseia em alguns fatores: primeiramente, trata-se de um importante exemplar da arquitetura moderna em Belo Horizonte, cidade onde a autora reside e trabalha. Além disso, o edifício é administrado pela UFMG, instituição na qual a autora exerce suas atividades profissionais. A facilidade de acesso a dados administrativos, plantas e documentos relacionados ao prédio foi um fator determinante, assim como a proximidade com o local, o que possibilita o acompanhamento direto e a realização de levantamentos complementares de informações, conforme necessário.

Devido ao tamanho e à complexidade da edificação, apenas o bloco em formato de L, correspondente à primeira fase de construção, será objeto de análise deste estudo. Esta área corresponde ao projeto inicial do edifício da Escola de Arquitetura e constitui uma área de preservação rigorosa. No Dossiê Histórico-Cultural e Arquitetônico (Belo Horizonte, 2008), que subsidiou o processo de tombamento da edificação, este bloco é denominado “Bloco Gonçalves Dias”. Porém, nesta dissertação o bloco será referenciado como “Bloco L”. A Figura 6 apresenta uma vista superior do quarteirão da Escola de Arquitetura, onde os três blocos estão destacados e numerados de acordo com a ordem de construção: Bloco 1 (Bloco L), Bloco 2 e Bloco 3.

Figura 6 – Vista superior da Escola de Arquitetura da UFMG.



Fonte: Elaborado pela autora a partir de imagem coletada do Google Earth em 11 de outubro de 2024.

Atualmente, a EA-UFMG oferece os cursos de graduação em Arquitetura e Urbanismo, nos períodos diurno e noturno, e Design, no período noturno, além de cursos de pós-graduação e especialização. O edifício possui salas de aula, laboratórios, salas de informática, sanitários, biblioteca, auditório, salas para departamentos, cantina, pátio interno e jardim, distribuídos em cinco pavimentos.

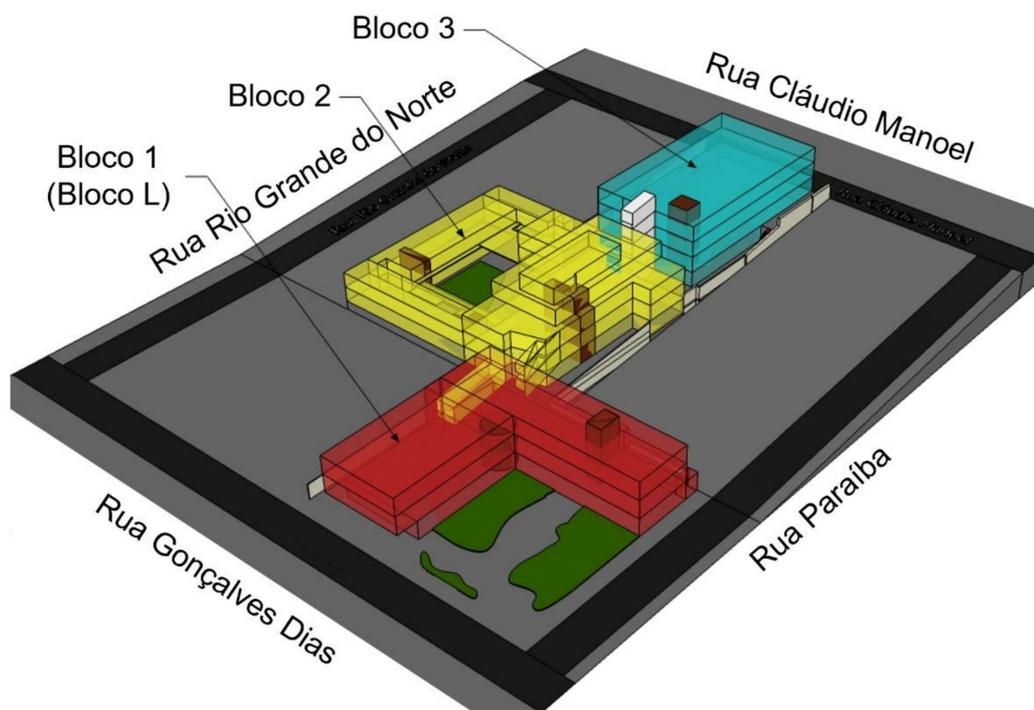
Localizado em uma das áreas mais valorizadas de Belo Horizonte, a “Savassi”, a EA possui aproximadamente 12.000 m², com sua volumetria distribuída ao longo de todo o quarteirão (Figura 6). O bloco L, que será tratado no estudo de caso, possui 2.600 m².

A arquitetura marcante da EA a posiciona entre os principais exemplos da nova corrente modernista que se consolidou no Brasil nos anos 1950, o que resultou em seu tombamento, inicialmente em 1990 pela Lei Orgânica do Município de Belo Horizonte (Belo Horizonte, 1990) e, posteriormente, em 2009 com o tombamento parcial pelo Patrimônio Histórico Municipal (UFMG, 2009).

Os três blocos da edificação foram consolidados em momentos distintos: A primeira fase da edificação é de 1954 (Bloco L), tendo como norteadores do projeto os princípios da arquitetura modernista. Já em 1955 ocorre a primeira expansão (Bloco

2) e entre 1964 e 1967 ocorre a segunda expansão (Bloco 3), distanciando dos preceitos modernistas inicialmente seguidos (Corrêa *et al.*, 2010; UFMG, 2009). A volumetria dos blocos pode ser vista na Figura 7. Para a primeira expansão, foram adquiridos os lotes vizinhos à área original, localizados dentro do mesmo quarteirão, estendendo-se até a Rua Cláudio Manoel. Nessa etapa, foram projetados tanto o pátio interno quanto as fachadas internas da escola (Lopes, 2022).

Figura 7 – Volumetria dos blocos da Escola de Arquitetura da UFMG.



Fonte: Adaptado de imagem do arquivo digital do CIT/DPP/PRA/UFMG, 2024.

De acordo com Corrêa *et al.* (2010) o projeto da sede da Escola de Arquitetura é atribuído aos arquitetos Shakespeare Sachtet Gomes e Eduardo Mendes Guimarães Júnior, embora existam divergências sobre essa coautoria. Ainda segundo os autores, algumas fontes indicam que o projeto teria sido inteiramente elaborado por Gomes, enquanto Guimarães teria contribuído apenas na execução da maquete. Por outro lado, outras fontes defendem que Guimarães esteve diretamente envolvido na concepção inicial do projeto, que passou por algumas modificações após sua primeira exibição pública. A confusão sobre a autoria se dá pelo fato de Guimarães não ter participado das fases subsequentes do projeto, incluindo as expansões posteriores, que foram de responsabilidade exclusiva de Gomes (Corrêa *et al.*, 2010).

Não há registros do projeto estrutural original, porém, a análise de fotografias antigas (Figuras 8, 9 e 10), aliada às informações presentes no Dossiê de Tombamento, permite identificar que a edificação possui estrutura de concreto armado com vedações em alvenaria de tijolos cerâmicos maciços.

Figura 8 – Estrutura do 2º pavimento (frente) do *hall* principal.



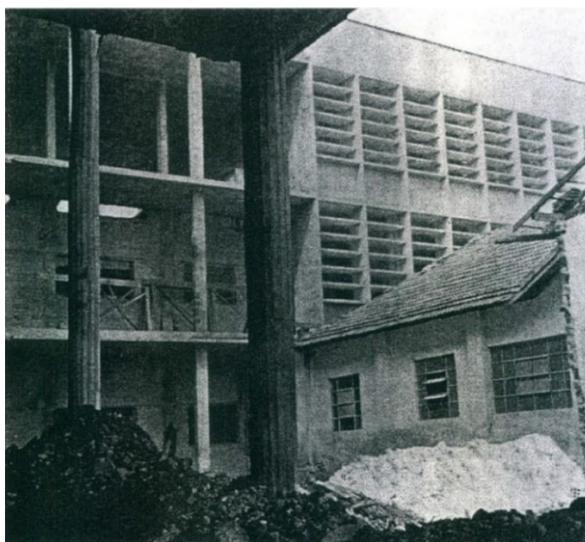
Fonte: Belo Horizonte, 2008, p. 192 (apud Universidade de Minas Gerais, 1953).

Figura 9 – Estrutura do *hall* principal – detalhe da escada em caracol.



Fonte: Belo Horizonte, 2008, p. 192 (apud Universidade de Minas Gerais, 1953).

Figura 10 – Estrutura do *hall* principal – detalhe do Prédio do Mercadinho ainda não demolido.



Fonte: Belo Horizonte, 2008, p.203 (apud Machado Filho, 1952, p. 52).

O terreno onde a escola se estabeleceu foi doado pela prefeitura de Belo Horizonte e existia no local uma edificação onde funcionava um mercado. A EA funcionou por um tempo no “Prédio do Mercadinho”, como era conhecido o local, e a nova construção adotou um partido em L que envolvia a construção existente (Figura 11). Assim, a EA não precisou paralisar as suas atividades até que a nova sede fosse construída. Posteriormente, o Prédio do Mercadinho foi demolido e no local foi construída uma praça, como pode ser observado na Figura 12 (Lopes, 2022). As Figuras 13 e 14 mostram a EA em 2008 e as Figuras 15 e 16 mostram a EA atualmente, em 2024. Percebe-se a grande deterioração da edificação e o ar de abandono decorrente das faltas de manutenção e vandalismo.

Figura 11 – Bloco L sendo construído e o Prédio do Mercadinho na esquina.



Fonte: CIT/DPP/PRA/UFMG, 2024.

Figura 12 – Edifício da EA na época de sua inauguração, em 1954, já com o Mercadinho demolido.



Fonte: Site Vitruvius, 2005.

Figura 13 – EA em 2008 (ângulo 1).



Fonte: Site EA-UFMG, s.d.

Figura 14 – EA em 2008 (ângulo 2).



Fonte: Site Boletim UFMG, 2008.

Figura 15 – EA em outubro de 2024
(ângulo 1).



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 16 – EA em outubro de 2024
(ângulo 2).



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Algumas das características mais marcantes da edificação são as amplas vidraças do *hall* de acesso e os *brises-soleis* verticais e horizontais, formando uma espécie de colmeia (Figura 15, 16, 17 e 18). Na parte interior, o *hall* se destaca pela imponente escadaria e pelo painel do artista Aroldo de Matos, localizado no mezanino (Figura 18) (Corrêa *et al.*, 2010).

Figura 17 – Fachada envidraçada no *hall*.



Fonte: Site EA-UFMG, s.d.

Figura 18 – Escadaria e painel ao fundo.



Fonte: Site EA-UFMG, s.d.

A volumetria do Bloco L cria um contraste com o espaço vazio da praça, evidenciando a dualidade entre cheio e vazio, racional e orgânico. Essas relações dialéticas são formadas pela geometria ortogonal da construção (cheio), destacada pelo ângulo reto do partido em "L", em oposição ao desenho fluido e natural da praça

(vazio). A praça criada, resultado da escolha do partido em "L", recebeu um paisagismo que melhora a integração entre o edifício, a rua e o entorno, funcionando como um ponto de transição entre áreas abertas e fechadas (Belo Horizonte, 2008).

As esquadrias metálicas são elementos que qualificam a volumetria do Bloco L, sendo usadas tanto no *hall* principal quanto em portas e janelas das fachadas (Figura 19). As janelas do segundo e terceiro andares contam com *brises*, típicos da estética modernista, que ajudam a reduzir a incidência solar. Na fachada paralela à Rua Gonçalves Dias, esses *brises* estão organizados em dois grupos que correspondem a esses pavimentos, projetando-se levemente da fachada. No primeiro pavimento, as aberturas são mais altas e não possuem *brises*, interrompidas pela porta de acesso, que acentua a simetria da fachada, revestida por pastilhas cerâmicas de tons terrosos no térreo e tons claros nos andares superiores (Figura 20) (Belo Horizonte, 2008).

Figura 19 – Detalhe das esquadrias metálicas e dos *brises* da fachada.



Fonte: Google Maps, abril/2024.

Na entrada do *hall* principal, localizada paralela à Rua Gonçalves Dias, há portas de vidro e uma fachada recuada, indicando o uso de estrutura independente, outro traço modernista. O auditório, situado no pavimento superior, tem pé-direito duplo (ver Figura 19), refletido na fachada por um único grupo de *brises*, diferente da

fachada voltada para a praça (ver Figura 20) que possui as janelas recuadas em relação à superfície e não possuem *brises* avançados, mantendo o equilíbrio entre as linhas horizontais e verticais (Belo Horizonte, 2008).

Figura 20 – Fachada voltada para praça.



Fonte: Google Maps, janeiro/2022.

A Figura 21 mostra a fachada paralela à Rua Paraíba, que, assim como a da Rua Gonçalves Dias, é composta por duas faces: uma recuada, formando a praça, e outra, cega, alinhada à rua Paraíba. Essa última é toda vedada em alvenaria de tijolo cerâmico revestida com pastilhas cerâmicas, com tons terrosos no primeiro pavimento e cores claras nos andares superiores. Os andares superiores se projetam ligeiramente em relação ao térreo, reforçando a ideia de uma base sólida para o edifício. A face voltada para a praça tem uma configuração distinta, com o primeiro pavimento marcado por uma grande superfície de vidro no *hall* principal, que cria uma conexão entre o jardim externo e o interior, destacando os pilares circulares e a estrutura independente. Nos pavimentos superiores, na área correspondente ao auditório, a fachada é revestida com pastilhas claras, exibindo o símbolo da Escola de Arquitetura da UFMG e o nome da instituição em perfis metálicos, posicionados estrategicamente acima da entrada do *hall* (Figura 22) (Belo Horizonte, 2008).

Figura 21 – Fachada da Rua Paraíba.



Fonte: Google Maps, abril/2024.

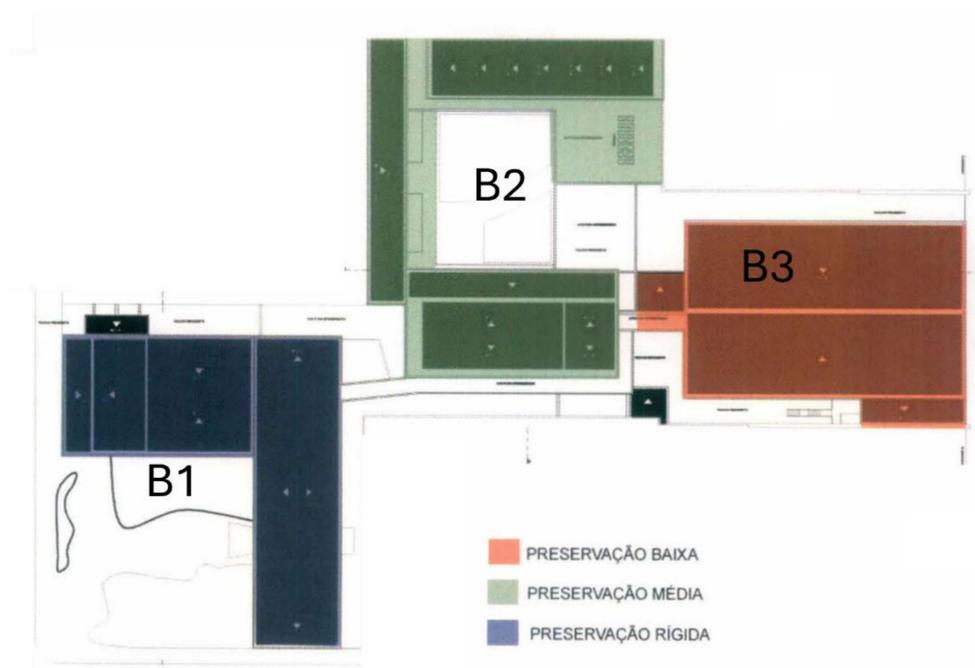
Figura 22 – Símbolo metálico.



Fonte: Site EA-UFMG, s.d.

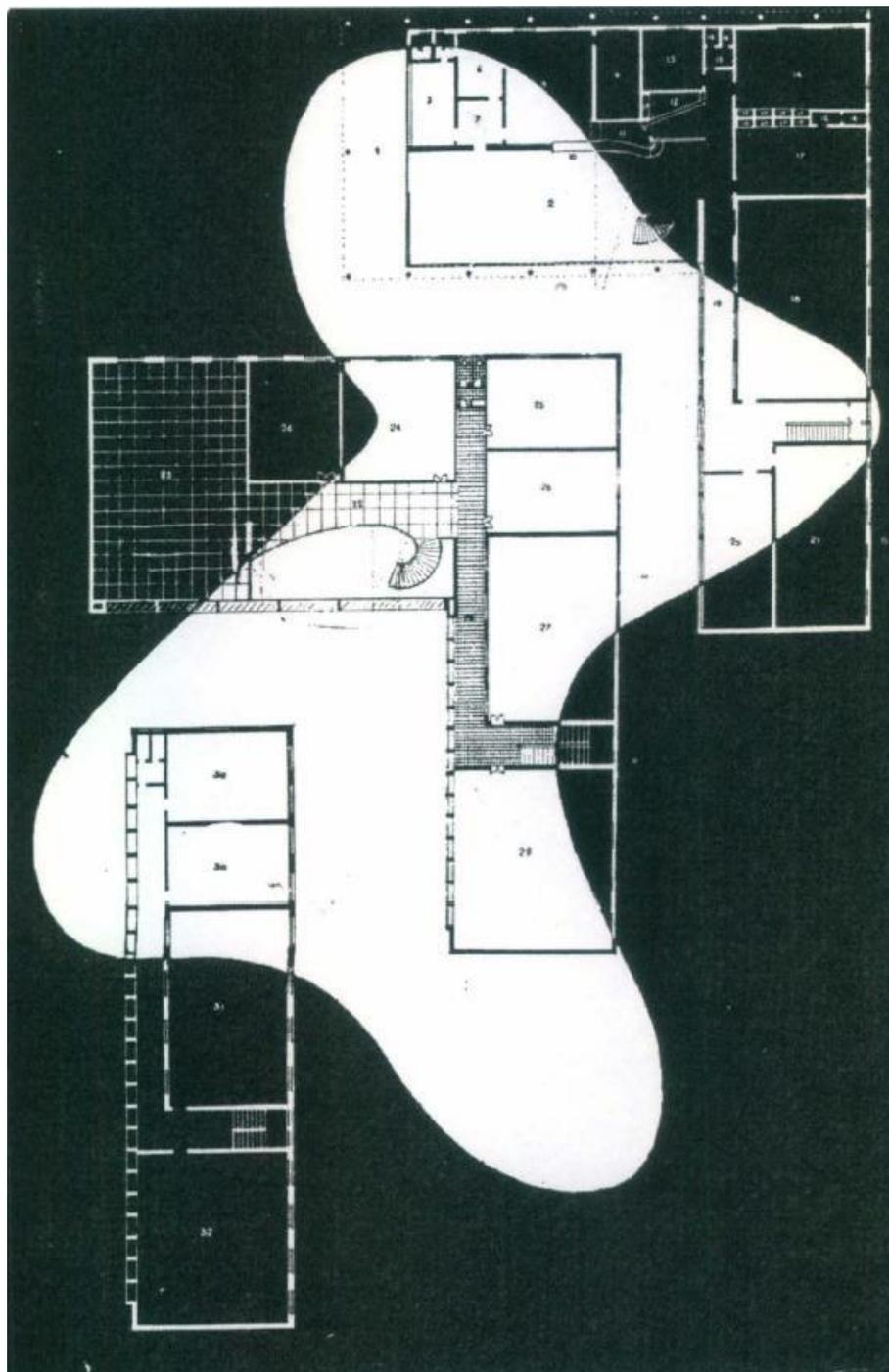
O projeto original do bloco L compreende três pavimentos e, devido ao seu status de tombamento, que impõe exigências rígidas de preservação, está sujeito a restrições que impedem alterações em sua volumetria e altimetria, assim como a modificações na praça existente e em seu plano paisagístico. Ademais, deve-se manter a dinâmica espacial e preservar os elementos e detalhes arquitetônicos do *hall*, como a escada, guarda-corpos, sancas, revestimentos, cores, entre outros (Belo Horizonte, 2008). A Figura 23 apresenta uma planta que setoriza os blocos da Escola de Arquitetura conforme as exigências de preservação do Patrimônio Cultural do Município de Belo Horizonte, enquanto a Figura 24 exhibe o desenho original previsto para o edifício.

Figura 23 – Blocos setorizados conforme as exigências de preservação.



Fonte: Belo Horizonte, 2008.

Figura 24 – Plantas do projeto original do Bloco L.



Fonte: Belo Horizonte, 2008.

Conforme mencionado anteriormente, este estudo de caso considerará exclusivamente o bloco L, parte integrante do projeto original e sujeito a exigências rigorosas de preservação. Para viabilizar uma análise energética que concilie eficiência e preservação patrimonial, torna-se essencial diagnosticar o estado atual de conservação da edificação e levantar informações que possam impactar o

desempenho térmico da envoltória. Dessa forma, a próxima seção será dedicada à avaliação dessas condições, com foco principal na caracterização do estado de conservação das paredes, dos pisos e dos tetos e nos elementos que influenciam a eficiência energética da envoltória, garantindo que as estratégias adotadas estejam alinhadas com as diretrizes de conservação do patrimônio.

4.1 DIAGNÓSTICO DO ESTADO DE CONSERVAÇÃO DO BLOCO L

A presente seção apresenta um diagnóstico do estado de conservação que foi desenvolvido a partir de visita técnica realizada no local no dia 25 de outubro de 2024. Foram utilizados como base desenhos técnicos disponibilizados pelo Departamento de Planejamento e Projetos da UFMG e informações disponíveis no Dossiê de Tombamento (Belo Horizonte, 2008).

O diagnóstico permite reconhecer, estudar e registrar as características da edificação em seu estado atual, tornando-se um instrumento científico essencial para o planejamento e a gestão de ações voltadas à preservação e à melhoria da sustentabilidade da EA. Além disso, é peça fundamental para o desenvolvimento do HBIM e para a simulação energética da envoltória.

Para simplificar o processo, o diagnóstico foi focado apenas no estado de conservação das paredes, dos pisos, dos tetos e nos elementos que influenciam a eficiência energética da envoltória.

As etapas do diagnóstico estão descritas a seguir:

- i. Levantamento dos três andares do Bloco L;
- ii. Registro das características e das condições físicas das paredes, pisos, coberturas e esquadrias;
- iii. Levantamento fotográfico;
- iv. Elaboração de texto referencial.

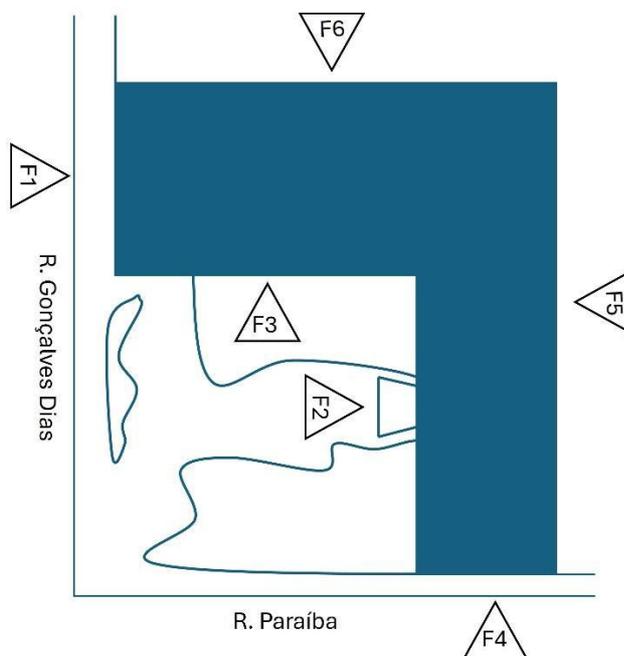
As plantas resultantes do levantamento dos três pavimentos do Bloco L, juntamente com as elevações, estão disponíveis no Apêndice B.

A descrição dos espaços seguirá uma ordem estabelecida: inicialmente, serão descritas as fachadas, seguidas dos andares, em ordem consecutiva, do primeiro ao terceiro.

4.1.1 Fachadas

A descrição das fachadas será baseada na Figura 25.

Figura 25 – Representação esquemática das fachadas do Bloco L.



Fonte: A autora.

A fachada F1, representada na Figura 26, possui um volume que se projeta em relação ao alinhamento do terreno, apoiado em pilares circulares revestidos em aço inoxidável, em mau estado de conservação. O volume superior é revestido de pastilhas cerâmicas 2x2 cm na tonalidade bege claro e o volume inferior é revestido em pastilhas cerâmicas 2x2 cm em tom terroso. As pastilhas apresentam acúmulo de sujeira, desgaste e algumas estão faltando. A porta da entrada principal possui vidros incolores, composta por duas folhas de correr e dois módulos fixos, em bom estado de funcionamento. O teto do pilotis, da entrada principal, recebe pintura na cor azul com tonalidade clara.

Figura 26 – Fachada F1.



Fonte: Google Maps, abril/2024.

As aberturas do Auditório, compõem retângulo horizontal emoldurado, como pode ser visto na Figura 26, e tem esquadrias vedadas com cortinas verticais tipo *black-out*, bastante danificadas (ver Figura 27).

Figura 27 – Esquadrias do auditório vistas do interior.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

A fachada F2, marcada de vermelho na Figura 28, apresenta volume superior revestido com pastilhas cerâmicas de 2x2 cm na cor bege claro, onde estão localizadas aberturas de iluminação de salas de aula, e volume inferior com pastilhas de mesma dimensão em tom terroso. As pastilhas apresentam acúmulo de sujeira, danos, pichações e, no caso das de cor terrosa, desbotamento devido à ação das intempéries. Possui *brises* horizontais (pequenas marquises em concreto, revestidas e pintadas na cor palha), arrematados por moldura que define volume retangular que se projeta em relação às esquadrias de fechamento dos segundo e terceiro pavimentos e esquadrias altas que levam iluminação à circulação interna do primeiro pavimento. As esquadrias possuem caixilharia em alumínio e vidro incolor, sendo duas folhas fixas e duas de correr.

Figura 28 – Fachada F2 em vermelho.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

A porta de entrada localizada nessa fachada era anteriormente destinada a alunos, mas atualmente este acesso encontra-se desativado, sendo utilizado apenas

esporadicamente. Acima da porta há uma marquise inclinada revestida em pastilhas cerâmicas 2x2 cm na cor bege claro, e sua borda denuncia a falta de algumas delas. As esquadrias possuem duas folhas de correr e dois módulos fixos; são de alumínio e vidro incolor.

A fachada F3 (Figura 29), recebe *brises* metálicos, funcionando como venezianas que barram o sol e exercem também a função de vedação, garantindo a ventilação. Não há vidro na área em que eles se encontram. Pano de vidros fixos define o plano inferior aos *brises*, as esquadrias possuem básculas superiores ao pano de vidro fixo e há *brises* internos, com comando à altura de 1,80 m, que necessitam de manutenção (ver Figura 30 e 31).

Figura 29 – Fachada F3.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 30 – Esquadrias com vidro fixo, básculas superiores e brises internos.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 31 – Comando das básculas   altura de 1,80 m.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

A fachada F4, representada na Figura 32   caracterizada por um plano cego revestido na parte superior com pastilhas de 2x2 cm em cor bege claro, que apresenta acúmulo de sujidades e picha es. Além disso, há uma faixa inferior revestida com pastilhas de 2x2 cm em tom terroso, bastante danificadas, desbotadas pela aço das intempéries e marcadas por sujeira, picha es e colagens.

Figura 32 – Fachada F4.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

A fachada F5, representada na Figura 33, apresenta pintura bastante deteriorada, com marcas de intempéries e esquadrias enferrujadas.

Figura 33 – Fachada F5.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

A fachada F6, representada na Figura 34, está localizada na circulação de serviços à esquerda da portaria principal. Conta com interferência de pilares em concreto com reboco grosso, pintado de branco, que sustentam a cabine de projeções do Auditório (Figuras 35 e 36). Essa volumetria no segundo pavimento é a cabine de projeção e não pertence ao projeto original. É um acréscimo lateral feito ao bloco, descaracterizando o volume moderno construído. Vários tubos de instalações estão presentes nas alvenarias laterais de forma aparente, o que contribui para o comprometimento visual do volume arquitetônico e deste acesso.

Figura 34 – Fachada F6.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 35 – Volumetria da cabine de projeção do auditório.



Fonte: Adaptado de Google Maps, 2024.

Figura 36 – Volumetria da cabine vista de dentro da edificação.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

4.1.2 Piso externo

As vias que definem o quadrante possuem revestimento asfáltico, a calçada é revestida de pedra portuguesa nas tonalidades branco e marrom, com desenhos similares ao traçado da praça e o piso da circulação externa, que dá acesso à entrada lateral de serviços, foi executada em cimento desempenado sem pintura.

4.1.3 Características do interior do edifício

O primeiro andar é marcado pelo *hall* com a escada em destaque. Possui salas administrativas, laboratórios, instalações sanitárias e copas de apoio, como pode ser visto na Figura 37.

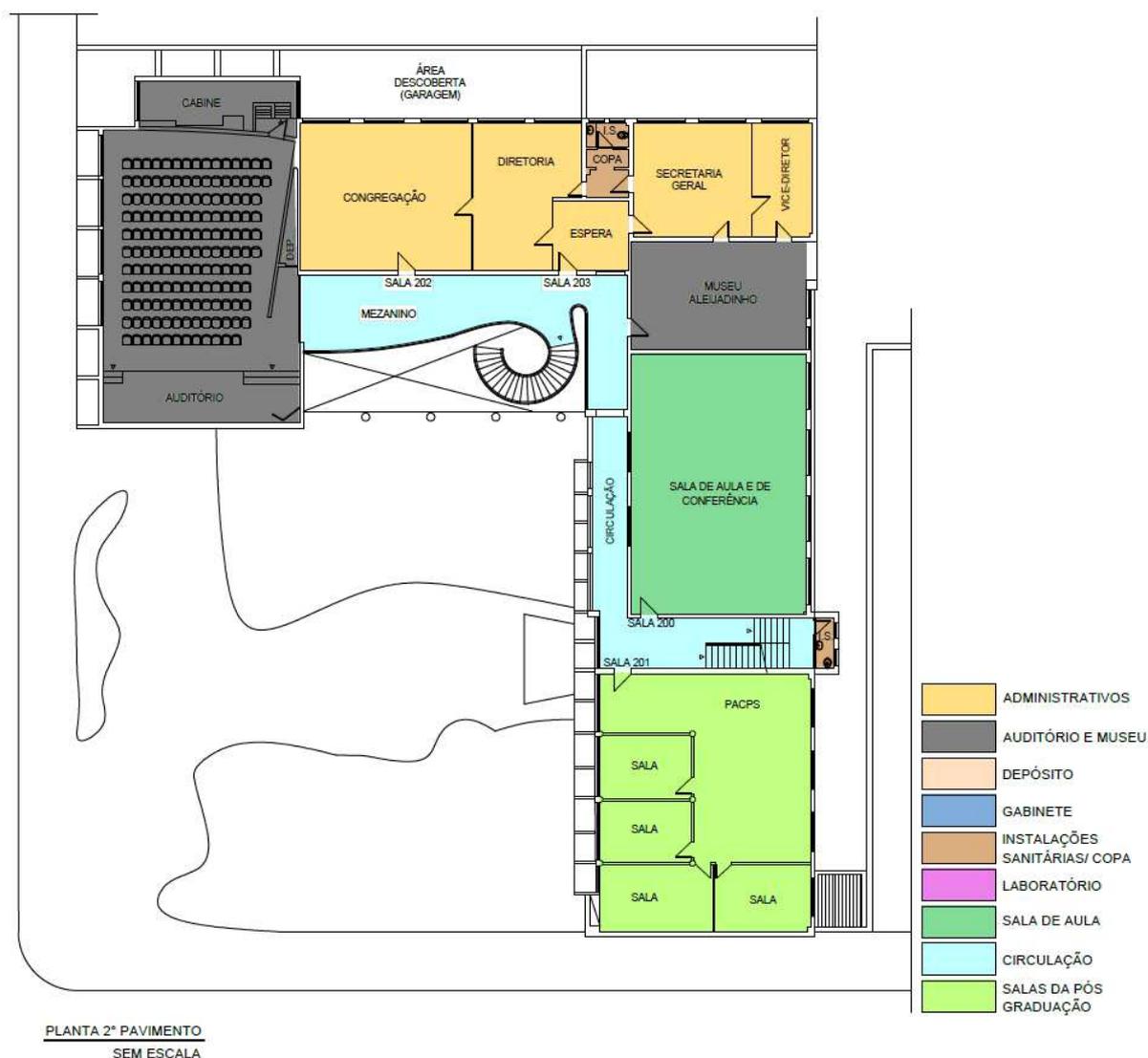
Figura 37 – Planta setorizada do primeiro pavimento.



Fonte: A autora.

O segundo andar é marcado pelo auditório, museu do Aleijadinho, pelas salas da diretoria, vice diretoria, secretaria geral e congregação. Possui também instalações sanitárias e copas de apoio, uma sala de aula e um espaço de salas destinadas ao Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável. A setorização dos espaços do segundo andar pode ser vista na Figura 38.

Figura 38 – Planta setorizada do segundo pavimento.



Fonte: A autora.

O terceiro andar contém os espaços destinados ao Departamento de Projetos que conta com gabinetes dos professores, sala da secretaria e sala da chefia do departamento, bem como uma sala destinada a atividades de monitoria, um depósito, banheiros e copa de apoio ao departamento. O andar também abriga o laboratório

Cosmópolis é um espaço de salas destinadas ao Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, com uma secretaria, uma sala de reuniões e um espaço aberto com uma grande mesa para atividades diversas. A setorização do terceiro andar pode ser vista na Figura 39.

Figura 39 – Planta setorizada do terceiro pavimento.



Fonte: A autora.

Os três andares possuem alguns acabamentos de piso, parede e teto em comum. Todas as salas possuem piso de taco de madeira de peroba (ver Figura 40), com acabamento em sinteco brilhante, em bom estado de conservação, apenas o laboratório Cosmópolis, no terceiro andar, apresenta o piso de taco com o sinteco

precisando de manutenção (ver Figura 41). Já o piso das circulações varia de andar para andar.

Figura 40 – Taco de madeira em bom estado de conservação.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 41 – Taco de madeira precisando de manutenção.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

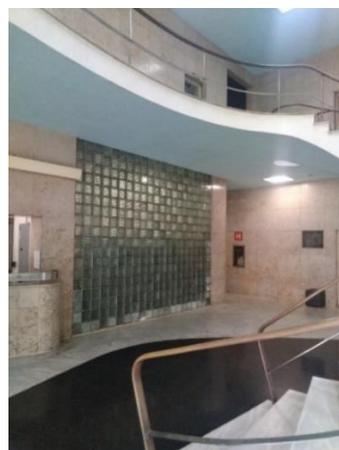
No primeiro andar, o piso do hall principal possui paginação especial que simula o traçado do desenho da praça, feita com mármore branco e granito preto. Os degraus da escadaria monumental são em mármore branco (ver Figura 42 e 43).

Figura 42 – Destaque para o piso do *hall*.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 43 – Destaque para o piso da escada.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Os pisos dos *halls* secundários foram executados com pedras serradas de mármore branco (peças de 50x50 cm) e o piso das escadas, próxima à entrada da praça, são executados em mármore branco no primeiro e segundo lance (ver Figuras 44 e 45). Os outros lances dessa escada, que vão ao segundo e terceiro andar, são executados em marmorite com argamassa em tom esverdeado, bem como os corredores do segundo e terceiro andar (ver Figuras 46 e 47). Quanto ao piso do mezanino, foi utilizado o mesmo mármore branco (50x50 cm) do hall principal.

Figura 44 – Piso do *hall* secundário em pedra serrada de mármore branco.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 45 – Piso do primeiro e segundo lance da escada em mármore branco.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 46 – Escada e *hall* de marmorite.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 47 – Piso de marmorite dos corredores.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Os banheiros e as copas possuem sempre o mesmo acabamento de piso, parede e teto. No piso utiliza-se uma cerâmica cinza antiderrapante (30x30 cm) e as paredes são revestidas até meia altura com cerâmica branca (20x20 cm) e rejunte preto e o restante pintada de branco. Os tetos são sempre pintados de branco (Ver Figura 48 e 49).

Figura 48 – Piso de copa e banheiros.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 49 – Paredes de copa e banheiros.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

As paredes das salas são predominantemente pintadas na cor branca, com exceção de alguns ambientes específicos: a sala administrativa da seção de compras e patrimônio, localizada no primeiro andar, apresenta paredes na cor verde; a sala de espera da diretoria, no segundo andar, possui paredes em tom cinza escuro; e o Museu do Aleijadinho, também no segundo andar, tem suas paredes pintadas em amarelo mostarda. Os tetos são sempre pintados de branco.

Algumas paredes e tetos apresentam sujidades e sinal de infiltração próximo às esquadrias, mas em geral, estão em bom estado de conservação (ver Figura 50 e 51).

Figura 50 – Infiltração.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 51 – Infiltração e sujeidade.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Algumas salas são divididas por divisórias navais. No segundo andar uma divisória naval amadeirada separa a Sala da Congregação e da Diretoria, e a secretaria geral da sala da vice direção. Ainda no segundo andar, o espaço destinado ao PACPS – Programa de Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável é o único espaço que possui separações executadas em divisórias de *drywall*. As demais divisórias existentes são divisórias navais simples, na cor branca (Ver Figuras 52 e 53).

Figura 52– Divisória naval amadeirada.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 53 – Divisórias navais simples.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

O auditório, localizado no segundo pavimento, é um espaço com características distintas. Possui, 154 poltronas estofadas em couro sintético preto, com estrutura em madeira. O piso do palco e da plateia é revestido com carpete na cor vermelha. As paredes são brancas. O teto recebe placas em gesso perfurado, na cor branca e grelhas metálicas (Ver Figuras 54 e 55).

Figura 54 – Plateia do auditório.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

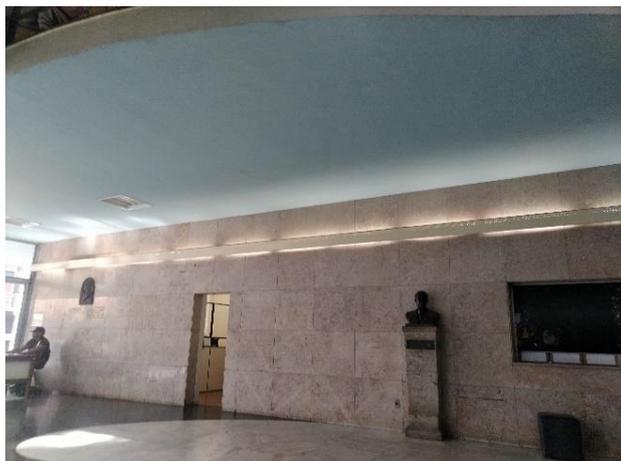
Figura 55 – Palco do auditório.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

O *hall* principal possui alvenarias revestidas em mármore (50x50 cm), assentadas com juntas secas, sendo que algumas delas apresentam ferrugem. Possui ainda uma parede de tijolos de vidro. Alguns tijolos encontram-se quebrados, nas proximidades do piso. O corrimão da escada monumental e o guarda-corpo do mezanino possuem detalhes em cobre e chapa de ferro pintado. Os tetos do *hall* e das circulações são rebocados e pintados na cor azul e estão em bom estado de conservação (Ver Figuras 56 e 57).

Figura 56 – Parede de mármore.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 57 – Parede de tijolo de vidro.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

O mezanino também possui paredes revestidas de mármore e possui uma treliça de madeira fazendo o fechamento da sala de espera da diretoria (Ver Figuras 58 e 59).

Figura 58 – Detalhe das paredes em mármore do mezanino.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 59 – Treliça de madeira.

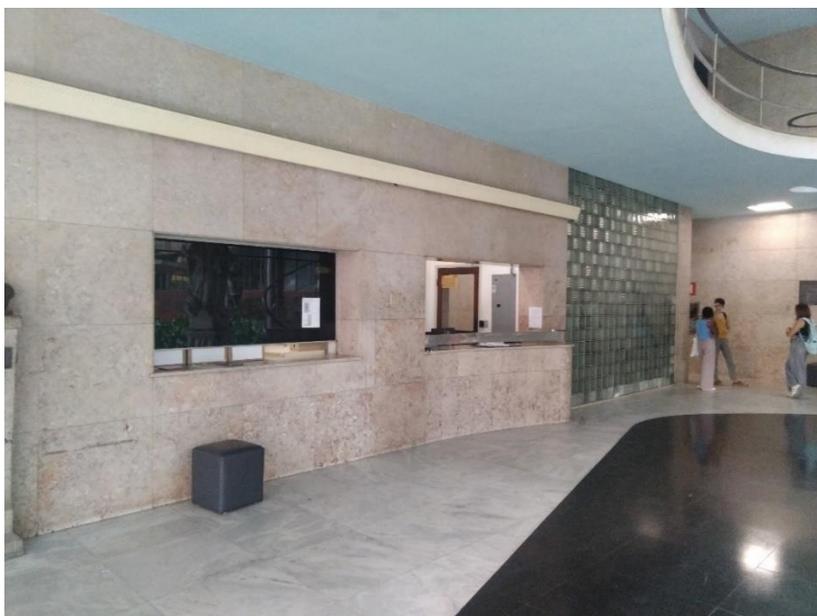


Fonte: Acervo da autora, 2024.

A portaria possui balcão que se projeta na alvenaria revestida em mármore e apresenta detalhes em aço inox. Por dentro o piso é de taco de madeira, em bom estado de conservação, com alvenarias internas e teto pintadas na cor branco. Há

também um espaço de atendimento ao lado da portaria com fechamento em vidro fumê (Ver Figuras 60).

Figura 60 – Detalhe do balcão no *hall* principal.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

As esquadrias das salas apresentam configuração de duas folhas, sendo uma fixa e outra de correr, ou configuração de quatro folhas, sendo duas fixas e duas de correr, e a maioria possui comando e funcionamento que necessitam de manutenção. A estrutura é metálica e os vidros incolores e lisos. As janelas localizadas no primeiro andar recebem gradeamento em chapa de ferro com configuração em forma de quadrados. As janelas das escadas são janelas de estrutura metálica, vidro incolor, lisos e são modelos fixos, que não abrem, promovendo apenas a iluminação. As janelas dos banheiros são basculantes, também de estrutura metálica, vidro incolor e canelado (Ver Figuras 61 a 64).

Figura 61 – Esquadria de uma sala.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 62 – Esquadrias de um banheiro.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 63 – Esquadrias de um corredor.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Figura 64 – Esquadrias vistas pelo lado externo da edificação.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Em todos os andares, as salas adjacentes à circulação possuem aberturas superiores voltadas para o corredor de circulação. São aberturas sem vidro para promover a ventilação cruzada (Ver Figuras 65).

Figura 65 – Esquadrias da sala para o corredor.



Fonte: Acervo da autora, 2024.

Em geral, todas as esquadrias necessitam de limpeza nos vidros.

4.2 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ENVOLTÓRIA

A envoltória refere-se ao conjunto de elementos externos que formam os fechamentos de uma edificação. Esses elementos, localizados acima do nível do solo e em contato direto com o ambiente externo, incluem coberturas, paredes e aberturas (MMA, 2015).

Em 2013, a Escola de Arquitetura recebeu a ENCE parcial (Etiqueta Nacional de Conservação de Energia) para o sistema de iluminação, com classificação B, e para a envoltória, com classificação C, conforme mostrado na Figura 66.

Figura 66 – ENCE de Edificação Construída da EA-UFMG.



Fonte: Disponibilizado por LABCON/UFMG, 2025.

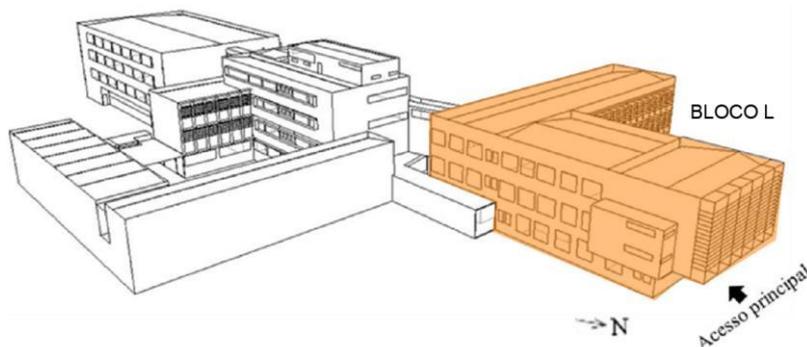
Para realizar a análise da envoltória utilizando o método de simulação por *software* deve-se seguir os requisitos técnicos e os métodos estabelecidos pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas (Brasil, 2010). Os dados referentes às características da envoltória da EA foram obtidos a partir do estudo de Garcia (2017) e de informações disponibilizadas pelo LABCON/UFMG.

Para efeito de simplificação, o Bloco L será considerado uma edificação independente, e não um bloco pertencente a uma edificação maior com outros blocos. Conforme estabelece a Nota Técnica 07/2014 (NT07), edificações compostas por blocos devem realizar a simulação de eficiência energética de cada bloco separadamente e, em seguida, calcular uma média ponderada. Considera-se, entretanto, que não haverá prejuízos para a análise do Bloco L, ainda que os demais blocos não sejam avaliados.

A edificação está localizada na região central de Belo Horizonte, classificada como Zona Bioclimática 3, caracterizada por clima quente e seco, com baixa umidade relativa do ar e alta amplitude térmica diária (ABNT NBR 15220-3, 2005). O Bloco L,

destacado em laranja na Figura 67, possui uma geometria em formato de L, com soluções de dispositivos de proteção solar e elementos de envoltória específicos.

Figura 67 – Modelo 3D EA-UFMG.

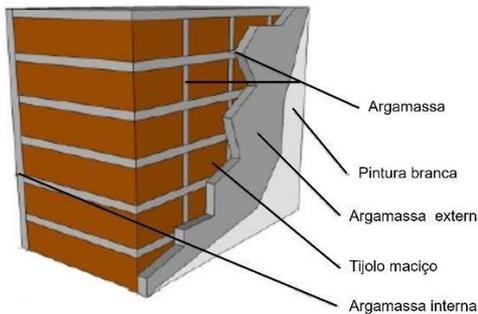
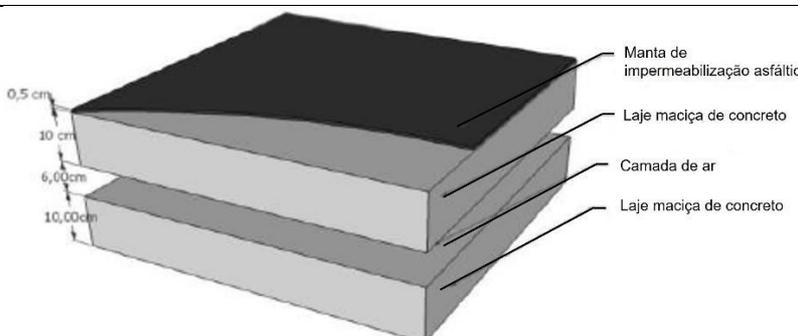
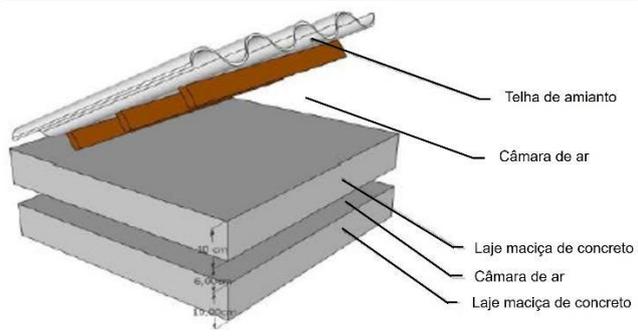


Fonte: Adaptado de Garcia, 2017, p.36.

A fachada da entrada principal do Bloco L é orientada para o norte com um azimute de 14° (CERTI, 2013). A ventilação da edificação é majoritariamente natural, com poucos ambientes utilizando ar-condicionado (Garcia, 2017).

No Quadro 8 estão descritos os materiais que constituem as paredes externas do Bloco L, com seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (Ct). Da mesma forma, estão descritos os materiais da cobertura.

Quadro 8 – Dados da envoltória da Escola de Arquitetura UFMG.

ENVOLTÓRIA	
Composição de paredes externas	
	Argamassa interna (2 cm) Bloco cerâmico maciço (28 X 12 X 6 cm) Argamassa externa (2 cm)
	$U [W/(M^2k)] = 2,16$ $Ct [Kj/M^2k] = 566$
Composição das coberturas	
Cobertura tipo 1	
	Manta de impermeabilização asfáltica 0,50 cm Laje maciça de concreto armado 10 cm Camada de ar 6 cm
	$U [W/(M^2k)] = 0,95$
Cobertura tipo 2	
	Telha de amianto 6 mm Câmara de ar 50 cm Laje maciça de concreto armado 10 cm
	$U [W/(M^2k)] = 1,02$

Fonte: Adaptado de Garcia, 2017, p.37.

O Relatório de Inspeção da EA (CERTI, 2013) fornece dados de área de abertura e elementos de sombreamento, obtidos a partir das plantas da edificação e dos dados utilizados no processo de etiquetagem, conforme o método prescritivo.

A Inspeção confirmou o nível C para a eficiência da envoltória da edificação como um todo, recomendando como medidas de melhoria a pintura das coberturas e das paredes com cores claras, de absorvância solar inferior a 0,5. Os dados sobre a absorvância solar dos materiais da envoltória foram obtidos a partir de ensaios

realizados em 2012. Neste estudo, utilizaremos as informações contidas nos laudos técnicos do LABCON/UFMG. Na Tabela 1 foram incluídos apenas os dados relativos ao Bloco L.

Tabela 1 – Dados de absorvância solar de materiais da envoltória do Bloco L.

Amostra	Especificação	Refletância (%)			Absorvância total (%) (470-940nm)
		Visível (470-780nm)	Não visível (780-940nm)	Total (470-940nm)	
1	Pastilha Cer. Tom terroso	14,89	16,01	15,41	84,59
2	Pastilha Cer. mesclada	28,62	28,54	28,58	71,42
3	Esquadria em alumínio	41,02	39,76	40,43	59,57
4	Pilar revestido em aço	15,89	17,97	16,59	83,41
5	Pedra mineira mesclada	35,68	37,21	36,39	63,61
6	Tinta branca suja	73,17	53,67	64,98	35,02
7	Tinta branco neve	88,00	76,00	82,39	17,61
8	Tinta branca Esq/portas	84,63	64,02	74,99	25,01
9	Tinta cinza Esq/portas	19,69	16,41	18,15	81,85
10	Laje placa concreto	6,94	9,14	7,97	92,03
11	Telha cimento amianto	15,94	14,33	15,19	84,81

Fonte: Elaborado a partir do Relatório de Inspeção da EA (CERTI, 2013).

Conforme mencionado, o cálculo de eficiência da envoltória é efetuado separadamente para cada bloco. Na Tabela 2 são apresentadas as variáveis que serão empregadas no cálculo da eficiência da envoltória do Bloco L.

Tabela 2 – Variáveis utilizadas no cálculo da eficiência da envoltória do Bloco L.

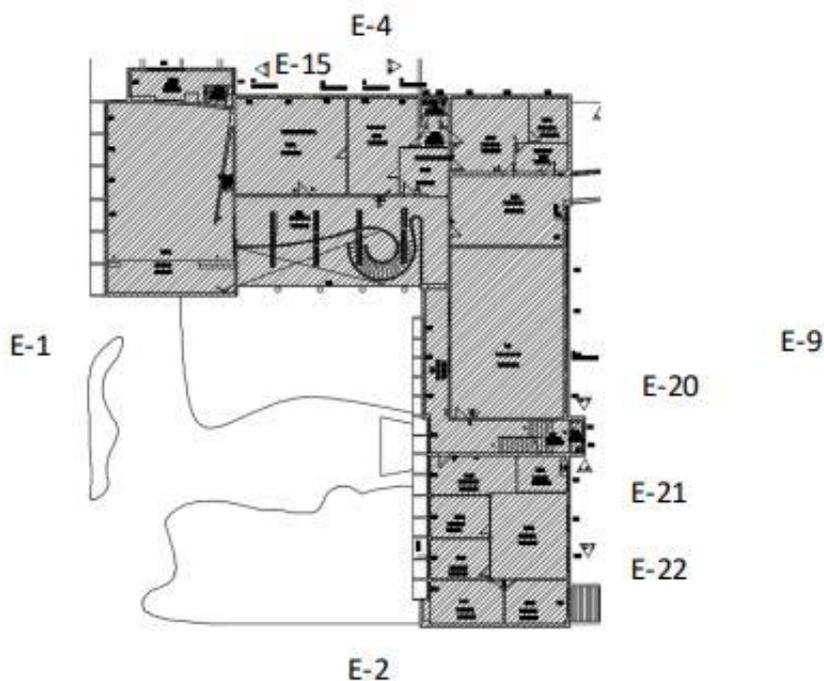
N. pavimentos	3
Pé direito (m)	3,90/ 3,60/ 3,70
Área de envoltória - Aenv (m ²)	2808,66
Área total construída - Atot (m ²)	2365
Área de projeção da cobertura - Apcob (m ²)	927,83
Área de projeção - Ape (m ²)	846,11
Volume total da edificação - Vtot (m ³)	9435,53
Transmitância térmica da cobertura - Ucob-ac [W/(m ² K)]	1,02
Transmitância térmica das paredes - Upar [W/(m ² K)]	2,16
Transmitância térmica do piso [W/(m ² K)]	2,80
Transmitância térmica do térreo [W/(m ² K)]	3,30
Percentual de abertura zenital - PAZ (%)	0,00
αCob (%)	84,81
αPar (%)	62,00
Fator Solar - FS	0,87
Percentual de abertura na fachada total - PafT (%)	22,93
Percentual de área de abertura na fachada oeste - PafO (%)	22,22
Ângulo vertical de sombreamento - AVS	21,06
Ângulo horizontal de sombreamento - AHS	2,85
Fator Altura, (Apcob/ Atot) - FA	0,39
Fator de Forma, (Aenv/ Vtot) - FF	0,30
Infiltração ACH (<i>Air Changes per Hour</i>)	1,00
Ocup. (m ² /pessoa)	14,00/ 3,70 /15,30

Fonte: Elaborado a partir de Garcia (2017).

A classificação C da envoltória é atribuída, principalmente, à alta absorção das coberturas, compostas por lajes de concreto armado e telhas de cimento amianto (com absorção superior a 0,80 no espectro solar). Segundo o RTQ-C (Brasil, 2010), para alcançar uma classificação A ou B, a cobertura deveria possuir uma cor de baixa absorção solar (menor que 0,50 no espectro solar), telhas cerâmicas não esmaltadas, teto jardim ou reservatórios de água.

Garcia (2017) utilizou o Bloco L como exemplo para organizar os dados de classificação conforme o método prescritivo proposto pela NT07 (2014). Esses dados serão empregados no presente estudo de caso diretamente no modelo HBIM com o intuito de serem interpretados corretamente pelo EnergyPlus. A Figura 68 mostra a planta do Bloco L com as divisões de fachadas efetuadas no presente estudo:

Figura 68 – Divisão das fachadas do Bloco L.



Fonte: Garcia, 2017, p.123.

As Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7 mostram os dados para classificação do bloco pelo método prescritivo:

Tabela 3 – Pré requisitos de coeficiente de transferência térmica e coeficiente de absorção térmica da cobertura.

Pré requisitos					
UCOB - AC [W/(m2K)]					1,02
Área 1	927,83	U1	1,02	Ponderação	946,3866
Área 2	0	U2	0	Ponderação	0
Total	927,83				946,3866
αCOB [%]					84,81
Área 1	927,83	α 1	0,98	Ponderação	909,2734
Área 2	0	α 2	0	Ponderação	0
Total	927,83				909,2734

Fonte: Garcia, 2017, p.123.

Tabela 4 – Dados dimensionais da edificação.

Dados Dimensionais da Edificação			
Fachadas	Área (m ²)	Pavimento	A. construída(m ²)
E-1	509,29	1 pav.	792,36
E-2	440,93	2 pav.	873,26
E-9	435,37	3 pav.	699,33
E-4	458,08	Atot (m ²)	2364,95
E-15	13,85		
E-20	7,56	Aproj.cob (m ²)	927,83
E-21	7,56		
E-22	8,19	Aproj. 1pav	792,36
Atot. Fachada	1880,83	Aproj. 2pav	873,26
Cobertura	927,83	Aproj. 3pav	872,72
Aenv. (m ²)	2808,66	Ape (m ²)	846,11

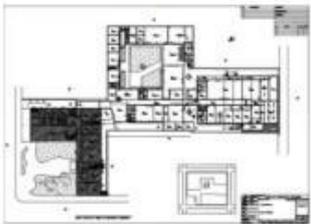
Fonte: Garcia, 2017, p.123.

Tabela 5 – Parâmetros Térmicos das Fachadas – Absorção e Transmissão de Calor.

Fachada	Área	α par [%]	62% Ponderação α	Upar [W/(m ² K)]	2,16 Ponderação U
E-1	127,56	0,72	91,84	2,16	275,53
	66,92	0,87	58,22	2,16	144,55
	12,25	0,53	6,49	2,16	26,46
E-2	211,74	0,72	152,45	2,16	457,36
	43,53	0,87	37,87	2,16	94,02
E-4	327,36	0,53	173,50	2,16	707,10
	0	-	-	-	-
E-9	312,2	0,53	165,47	2,16	674,35
	0	-	-	-	-
E-20	7,56	0,53	4,01	2,16	16,33
E-21	7,56	0,53	4,01	2,16	16,33
E-15	13,85	0,53	7,3405	2,16	29,92
E-22	7,74	0,53	4,1022	2,16	16,72
Total	1138,27		705,30		2458,66

Fonte: Garcia, 2017, p.124.

Tabela 6 – Volume dos pavimentos

Volume			
1º pav.		2º pav.	
			
Área (m ²)	792,36	Área (m ²)	538,3
Pé direito (m)	3,9	Pé direito (m)	3,7
Volume (m ³)	3090,20	Volume (m ³)	1991,71
3ª pav.			
			
Área:	859,8	Área (m ²)	334,96
Pé-direito:	3,7	Pé direito (m)	3,5
Volume:	3181,26	Volume (m ³)	1172,36
Volume total (m ³)			9435,53

Fonte: Garcia, 2017, p.124.

Tabela 7 – Dados das aberturas.

Dados das aberturas											
Fachada	Área (m ²)	Pav.	Janela	A. abertura (m ²)	Qtid.	A. ab. total (m ²)	Oeste	AVS	Pond. AVS	AHS	Pond. AHS
E-1	153,45	1	J01	20,28	1	20,28	N	49	993,72		
			J03	5,52	1	5,52	N	42	231,84		
			J04	13,45	1	13,45	N				
			J19	16,08	1	16,08	N				
			J59	9,6	1	9,6	N	66	633,6		
E-1	159,81	2	J71	2,58	2	5,16	N	64	330,24		
			J72	5,25	1	5,25	N	64	336		
			J73	5,94	4	23,76	N	64	1520,64		
			J74	5,33	1	5,33	N	64	341,12		
			J92	4,34	4	17,36	N	67	1163,12		
			J96	0	1	0	N				
E-1	196,03	3	J71	2,58	2	5,16	N	64	330,24		
			J72	5,25	1	5,25	N	64	336		
			J73	5,94	4	23,76	N	64	1520,64		
			J74	5,33	1	5,33	N	64	341,12		
			J96	0	1	0	N				
E-2	127,19	1	J02	68,5	1	68,5	SIM				
E-2	138,2	2	J76	2,21	1	2,21	SIM				
E-2	175,55	3	J95	6,82	4	27,28	SIM			45	1227,6
E-4	125,17	1	J05	2,96	5	14,8	N	51	754,8		
			J06	0,97	4	3,88	N	60	232,8		
E-4	137,08	2	J66	3,67	4	14,68	N				
			J67	3,67	1	3,67	N				
			J69	0,68	2	1,36	N				
			J70	3,67	3	11,01	N				
			J96	0	1	0	N				
E-4	192,63	3	J05	2,96	5	14,8	N				
			J69	0,68	2	1,36	N				
			J70	3,67	3	11,01	N				
			J96	0	1	0	N				
E-9	141,47	1	J10	5,42	1	5,42	N				
			J11	1,1	1	1,1	N				
			J12	2,95	1	2,95	N				
			J13	1,7	1	1,7	N				
			J14	3,67	4	14,68	N				
			J15	0,49	2	0,98	N				
			J16	2,95	2	5,9	N				
			J17	2,1	1	2,1	N				
E-9	141,48	2	J14	3,67	4	14,68	N				
			J15	0,49	2	0,98	N				
			J16	2,95	4	11,8	N				
			J75	1,72	1	1,72	N				
			J76	2,21	1	2,21	N				
E-9	152,4	3	J13	1,7	1	1,7	N				
			J14	3,67	4	14,68	N				
			J16	2,95	4	11,8	N				
E-20	7,56	1	-	0	-	0	N				
E-21	7,56	1	-	0	-	0	N				
E-22	8,19	1	J18	0,15	2	0,3	N				
E-15	7,9	1	-	0	-	0	N				
E-15	2,79	2	J96	0	1	0	N				
E-15	3,1	3	J96	0	1	0	N				
Total	1877,56					430,55		AVS	21,06	AHS	2,85
PaT	22,93										
PaO	22,22										

Fonte: Garcia, 2017, p.125.

Munido de todas essas informações, Garcia (2017) inseriu os dados no serviço web de avaliação da ENCE, utilizando o método prescritivo por meio da plataforma WebPrescritivo, conforme ilustrado na Figura 69.

Figura 69 – Dados inseridos no WebPrescritivo.

The screenshot shows the 'WebPrescritivo' interface with the following data entered:

- Localização:** Zona Bioclimática: ZB 3; Cidade: Belo Horizonte MG
- Pré-requisitos:**
 - U_{COB-AC} : 1.02 W/(m²K); α_{COB} : 84.81 %
 - $U_{COB-ANC}$: 1.02 W/(m²K); CT_{PAR} : 0 kJ/(m²K)
 - U_{PAR} : 2.16 W/(m²K); α_{PAR} : 62 %
 - PAZ : 0 %; FS : 0
- Dados Dimensionais da Edificação:**
 - A_{TOT} : 2364.95 m²; FA : 0.39
 - A_{PCOB} : 927.83 m²
 - A_{PE} : 846.11 m²
 - V_{TOT} : 9435.53 m³; FF : 0.30
 - A_{ENV} : 2808.66 m²
- Características das Aberturas:**
 - FS : 0.87
 - PAF_T : 22.93 %
 - PAF_D : 22.22 %
 - AVS : 21.06 °
 - AHS : 2.85 °

Buttons: 'Calcular Eficiência', 'Limpar'. A color bar at the bottom shows a green bar under 'A'.

Sem pré-requisito	A	Icenv	173,01	A	B	C	D	E	
		IcenvmáxD	231,88	Lim Mín.	-	211,87	218,54	225,22	231,89
		Icenvmín	205,19	Lim Máx.	211,86	218,534	225,21	231,88	-
		i	6,67						

Fonte: Garcia, 2017, p.125.

Após a criação do modelo HBIM, incorporando dados históricos e informações sobre o estado de conservação do Bloco L da EA, os parâmetros necessários para a análise da eficiência energética da envoltória serão adicionados. Em seguida, será avaliada a viabilidade da simulação do modelo no EnergyPlus.

4.3 PROTÓTIPO VIRTUAL DA EDIFICAÇÃO – HBIM/BEM

O protótipo virtual da edificação, desenvolvido de forma paramétrica, representa não apenas suas características geométricas, mas também as interações entre seus componentes, incluindo seus parâmetros e atributos associados. No contexto do BIM, a representação digital configura-se como um modelo de informação, ou seja, um modelo geométrico enriquecido por dados que caracterizam os componentes da edificação (Ruschel, 2014).

Segundo Succar (2009), o processo começa com a modelagem digital da edificação ou de seus componentes, avança para a integração de modelos compostos e culmina no desenvolvimento colaborativo de modelos holísticos que representam um protótipo virtual completo da edificação.

No estudo de caso desta dissertação, o modelo HBIM será desenvolvido no Autodesk Revit, enquanto a simulação energética será realizada no EnergyPlus. Esses *softwares* foram identificados na Revisão Sistemática de Literatura como as ferramentas mais utilizadas para essas finalidades.

4.3.1 Processo de modelagem no Autodesk Revit

No presente estudo de caso, o desenvolvimento do modelo HBIM do Bloco L foi baseado em plantas, elevações, cortes e fachadas disponibilizados em arquivo CAD (extensão DWG) pelo Departamento de Planejamento e Projetos da UFMG. Como esses desenhos estavam desatualizados e apresentavam algumas inconsistências, foi necessário realizar um levantamento *in loco* para corrigir as divergências identificadas.

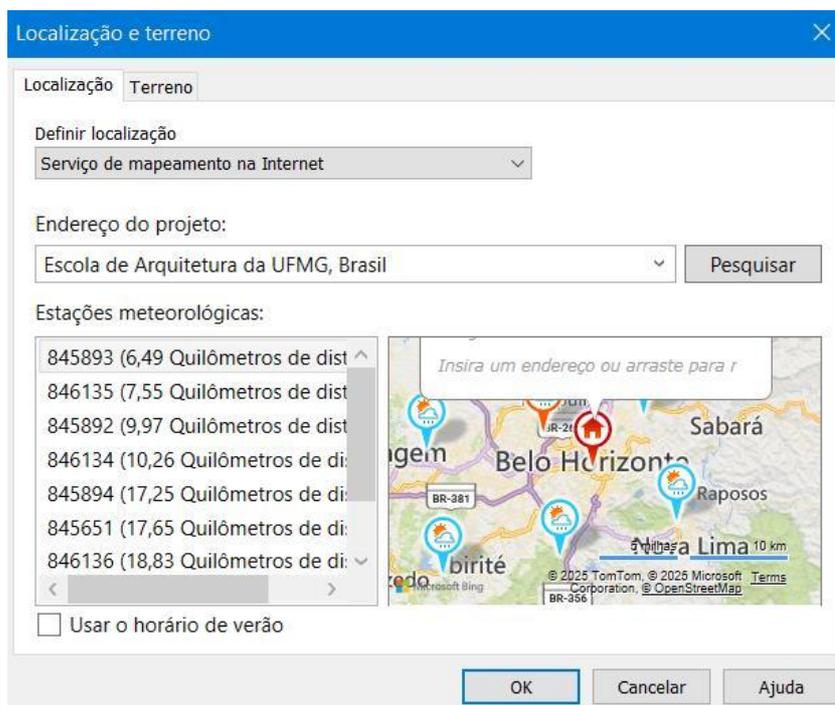
O *software* escolhido para a modelagem foi o Autodesk Revit (versão 2025), amplamente referenciado nos artigos analisados na Revisão Sistemática de Literatura (RSL).

O Revit foi originalmente lançado em 1997 e, após a aquisição da desenvolvedora pela Autodesk em 2002, passou por significativas evoluções e incorporações de funcionalidades avançadas (Dantas, 2022). O Autodesk Revit é uma ferramenta baseada na metodologia BIM, projetada para auxiliar profissionais das áreas de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC). Segundo a Autodesk (2025), o Revit possibilita a modelagem precisa de formas arquitetônicas complexas, além da organização e gestão de documentos técnicos, como plantas, elevações, vistas e perspectivas. Além disso, a ferramenta suporta diferentes disciplinas envolvidas no processo de projeto e construção de edifícios.

Para atender às necessidades deste estudo, adotou-se o nível de detalhamento 300 (LOD 300), conforme indicado na Fundamentação Teórica, por ser adequado à simulação planejada.

Com o objetivo de viabilizar a futura análise energética do modelo HBIM, a primeira etapa fundamental foi a correta configuração da localização e do norte geográfico da edificação. A Figura 70 apresenta a janela de configuração de localização e terreno no Revit.

Figura 70 – Janela de configuração e terreno no Revit.



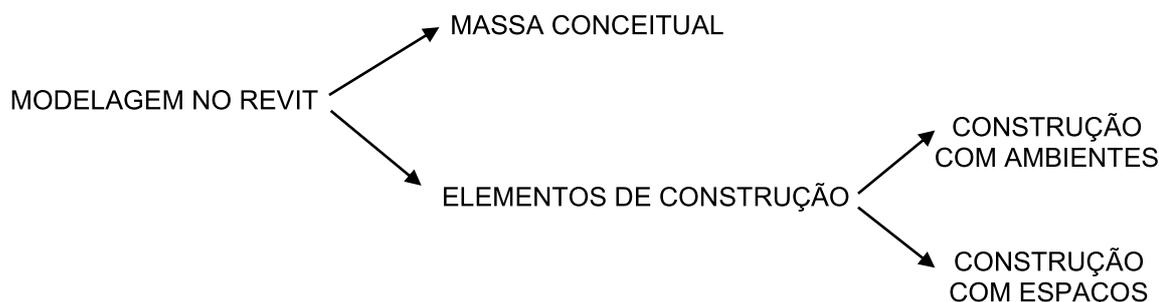
Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Para a modelagem dos elementos construtivos no Revit (paredes, lajes, janelas, portas e coberturas), é possível optar por massas conceituais ou elementos de construção. As massas conceituais são formas genéricas utilizadas para exploração inicial de ideias, funcionando como um esboço sem muitos detalhes (Barroso *et al.*, 2020). Já os elementos de construção possuem características construtivas detalhadas, incluindo camadas de materiais, dimensões, espessuras e propriedades físicas.

Com base na modelagem por elementos de construção, existem duas abordagens distintas de configuração: uma que delimita áreas e volumes por meio dos componentes de ambientes e outra que utiliza componentes de espaços. No Revit, essas categorias possuem definições específicas que impactam a análise energética, pois fornecem informações distintas sobre iluminação, equipamentos e ocupação. Os ambientes adotam configurações padronizadas para diferentes tipos de edificações, como hospitais, hotéis, bibliotecas, igrejas e residências unifamiliares, de acordo com os parâmetros predefinidos pelo *software*. Já os espaços permitem a inserção de dados personalizados pelo usuário dentro do próprio Revit (Autodesk, 2025).

A Figura 71 ilustra os diferentes caminhos para a modelagem no Revit:

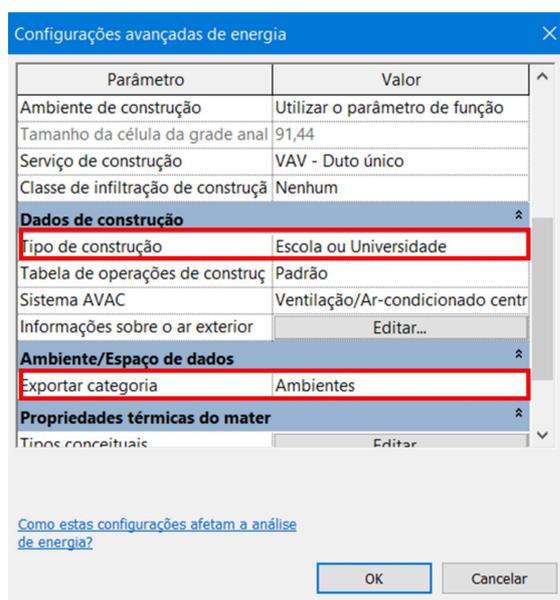
Figura 71 – Tipos de modelagem no Revit.



Fonte: A autora.

Neste estudo de caso, optou-se pela modelagem por elementos de construção com ambientes, configurando a edificação como "Escola ou Universidade" (Figura 72). A modelagem de edificações históricas exige muita fidelidade à realidade, especialmente quando o modelo será utilizado para a análise energética.

Figura 72 – Configuração de tipo de construção e exportação por ambientes.



Fonte: Captura de tela do software Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Por padrão, os espaços utilizam as propriedades térmicas dos materiais atribuídos às camadas dos elementos de construção no Revit (Autodesk, 2025). Esses espaços devem ser identificados pelo EnergyPlus como zonas térmicas para a simulação energética. Idealmente, essa identificação ocorre automaticamente, mas,

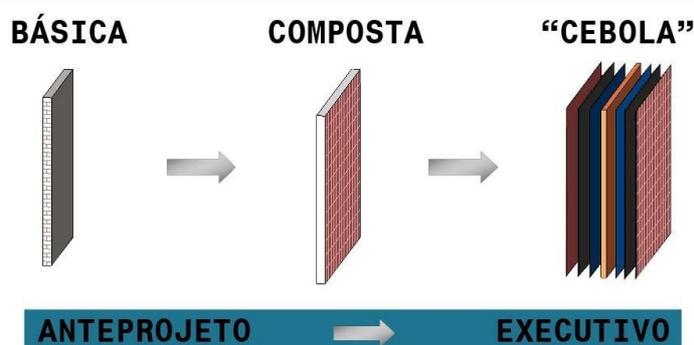
devido a possíveis problemas de interoperabilidade, pode ser necessário corrigir as zonas no EnergyPlus.

Após a definição da modelagem por elementos de construção com espaços, foi escolhido o método de modelagem das paredes. No Revit, há diferentes abordagens para a construção de paredes, sendo as mais comuns: parede básica, parede composta e parede cebola.

- Parede básica: considera apenas a espessura da parede, sem especificação de materiais. É comumente utilizada em fases iniciais de projeto, onde os quantitativos e as características dos materiais ainda não são tão importantes.
- Parede composta: permite modelar a parede com subelementos representando suas camadas construtivas. Cada camada pode ter um material, espessura e função específicos, facilitando a estimativa de quantitativos.
- Parede cebola (ou paredes justapostas): cada camada da parede é modelada como um elemento independente, proporcionando maior precisão na quantificação de materiais. No entanto, exige mais tempo de modelagem e um maior controle na associação dos elementos que se movem juntos através de travamento, facilitando possíveis alterações ao longo do desenvolvimento do projeto (SPBIM, 2025).

A Figura 73 ilustra essas diferentes abordagens de modelagem de paredes no Revit.

Figura 73 – Parede básica, composta e cebola no Revit.



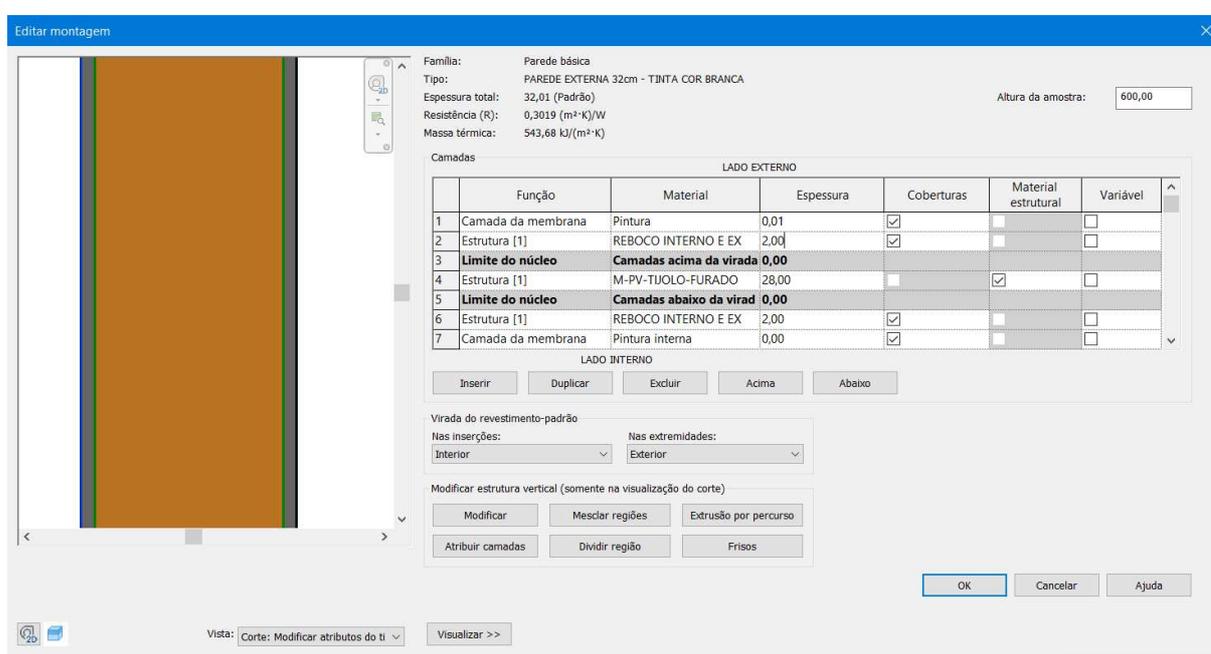
Fonte: Youtube - Eng. Luis Fernando, 2021.

Para este modelo HBIM, a parede composta foi considerada a opção mais adequada, por possibilitar a inserção das diversas camadas da parede em um único elemento. Na parede composta é possível representar de maneira fiel o que de fato

existe na edificação, além de possibilitar alterar as propriedades de cada material separadamente. As paredes básicas não apresentam informações de materiais e a parede cebola, por apresentar os elementos justapostos, poderiam resultar em erros quando o *software* calcular automaticamente os parâmetros e do EnergyPlus interpretar as zonas térmicas. A mesma lógica foi aplicada à modelagem dos pisos.

A Figura 74 apresenta, como exemplo, as configurações das camadas de composição de uma parede externa do Bloco L.

Figura 74 – Configurações das camadas de composição da parede.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

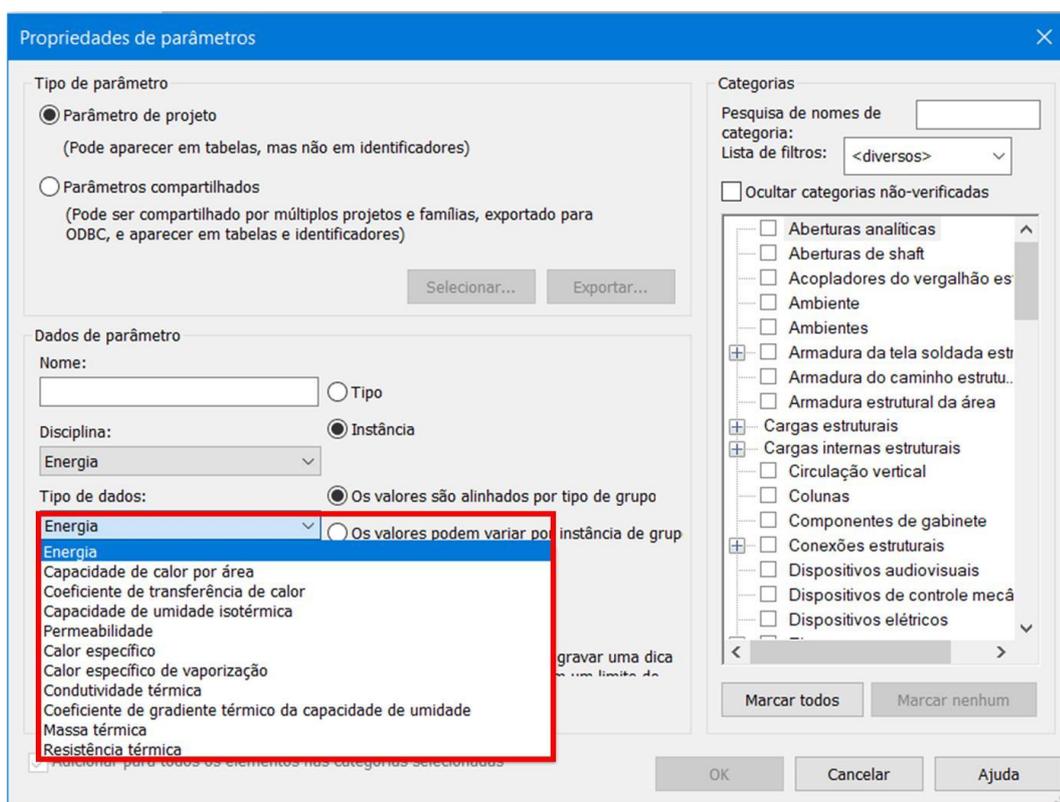
O Revit conta com uma biblioteca de materiais pré-configurados e permite a criação de novos materiais, incluindo a inserção de suas propriedades físicas. Assim, é possível calcular automaticamente as características dos materiais corretamente configurados.

Os materiais dos elementos construtivos do Bloco L foram caracterizados em relação ao seu estado de conservação e propriedades térmicas. Alguns parâmetros já existiam no programa, enquanto outros precisaram ser criados. As propriedades térmicas inseridas incluem condutividade térmica, calor específico, transmitância visível (transmissão de luz visual no Revit), transmitância térmica (coeficiente de

transferência de calor), absorvância térmica (absorção no Revit), densidade e fator solar (coeficiente de ganho de calor solar).

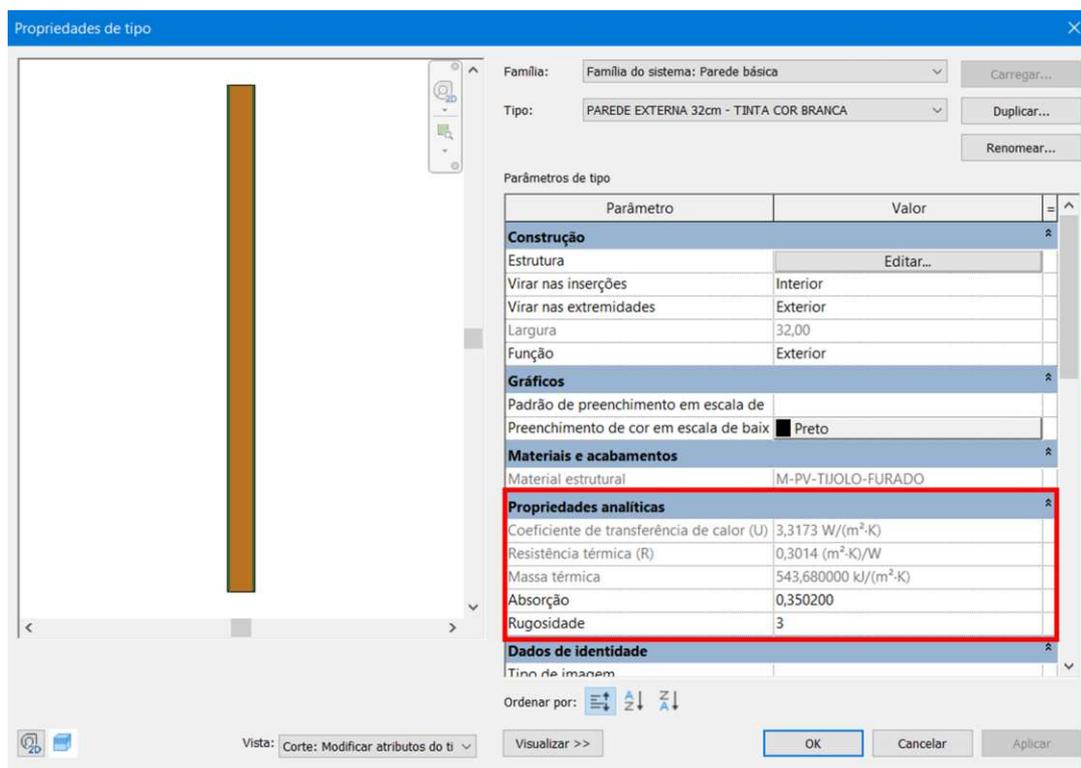
A Figura 75 mostra os parâmetros de energia do projeto, as Figuras 76 e 77 mostram parâmetros de tipo de uma parede e de tipo de uma janela, respectivamente, e alguns parâmetros são configurados direto no navegador de materiais, como pode ser visto na Figura 78.

Figura 75 – Parâmetros de energia do projeto.



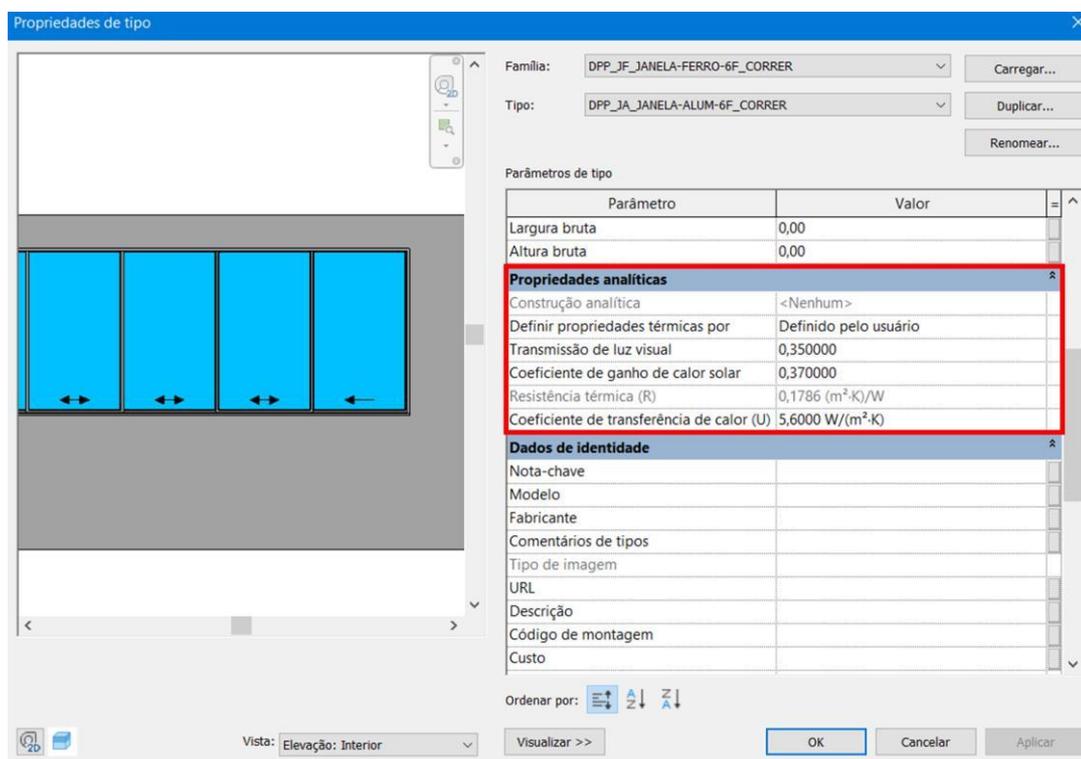
Fonte: Captura de tela do software Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 76 – Configurações de parâmetros de tipo de uma parede externa.



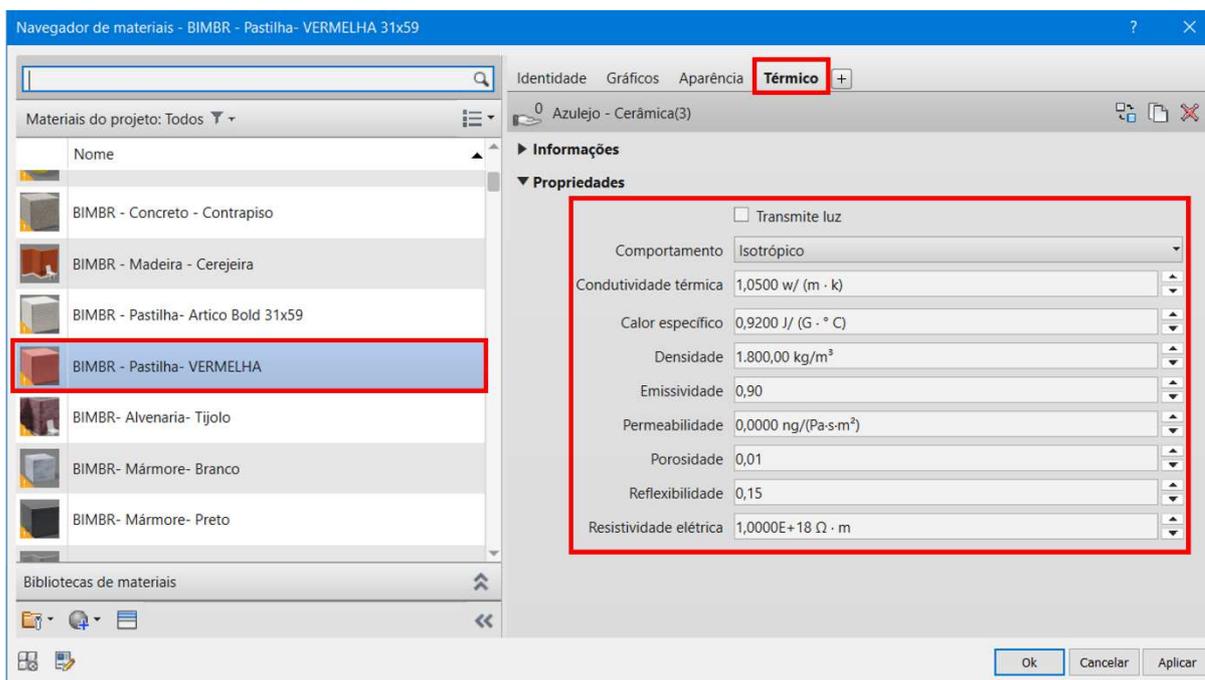
Fonte: Captura de tela do software Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 77 – Configurações de parâmetros de tipo de uma janela.



Fonte: Captura de tela do software Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 78 – Configurações de parâmetros no navegador de materiais.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

O Revit calcula automaticamente a transmitância térmica das paredes e coberturas, não permitindo a edição direta do campo "coeficiente de transferência de calor (U)" desses elementos. A Figura 79 ilustra o campo utilizado para inserção da absorção térmica e o campo bloqueado da transmitância térmica (coeficiente de transferência de calor). A absorvância (ou absorção) é definida para o componente como um todo, sem possibilidade de atribuir essas características individualmente aos materiais.

Figura 79 – Preenchimento da absorção e cálculo automático da transmitância térmica.

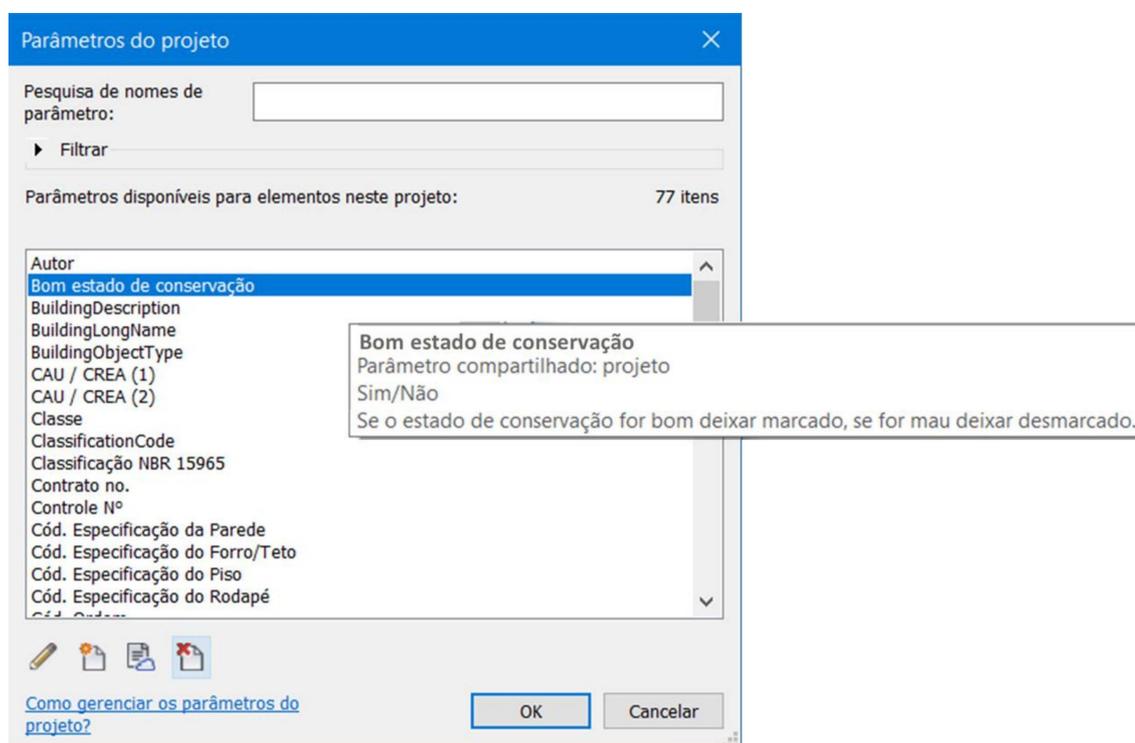
Propriedades analíticas	
Coefficiente de transferência de calor (U)	3,3173 W/(m ² ·K)
Resistência térmica (R)	0,3014 (m ² ·K)/W
Massa térmica	543,680000 kJ/(m ² ·K)
Absorção	0,350200
Rugosidade	3

Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

O Revit também realiza automaticamente os cálculos da capacidade térmica dos materiais. No entanto, os valores gerados pelo *software* apresentam discrepâncias em relação aos dados utilizados nesta pesquisa, que foram coletados dos Relatórios de Inspeção da edificação para a etiquetagem energética (CERTI, 2013). De acordo com o CERTI (2013), o coeficiente de transferência de calor (U) das paredes externas é de 2,16 W/(m²K), enquanto o Revit apresenta um valor de 3,3173 W/(m²K). Essa diferença pode impactar significativamente os resultados da simulação energética. Além disso, o Revit fornece valores individualizados para cada elemento da cobertura, enquanto o relatório apresenta um único valor agregado para todos os elementos, dificultando uma comparação direta entre os resultados.

Para registrar o estado de conservação dos materiais, foi criado um parâmetro binário (sim/não) denominado "Bom estado de conservação" (Figuras 80 e 81). Esse parâmetro consiste em uma caixa de seleção desmarcada por padrão. Caso o material esteja em boas condições, basta marcar a caixa; caso contrário, a caixa permanece desmarcada.

Figura 80 – Parâmetro de projeto “Bom estado de conservação”.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 81 – Propriedades do parâmetro de projeto “Bom estado de conservação”.

Propriedades de parâmetros

Tipo de parâmetro

Parâmetro de projeto
(Pode aparecer em tabelas, mas não em identificadores)

Parâmetros compartilhados
(Pode ser compartilhado por múltiplos projetos e famílias, exportado para ODBC, e aparecer em tabelas e identificadores)

Selecionar... Exportar...

Dados de parâmetro

Nome: Tipo

Disciplina: Instância

Comum

Tipo de dados: Os valores são alinhados por tipo de grupo

Sim/Não Os valores podem variar por instância de grupo

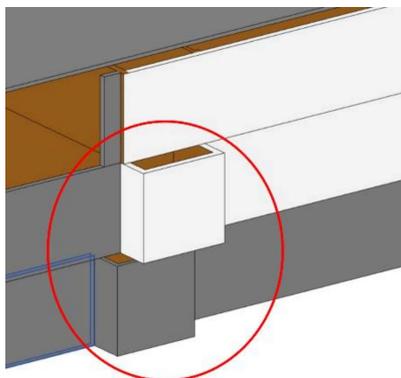
Parâmetro de grupo sob: Dados de identidade

Descrição da dica de ferramenta
Se o estado de conservação for bom deixar marcado, se for mau deixar desmarcado.

Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

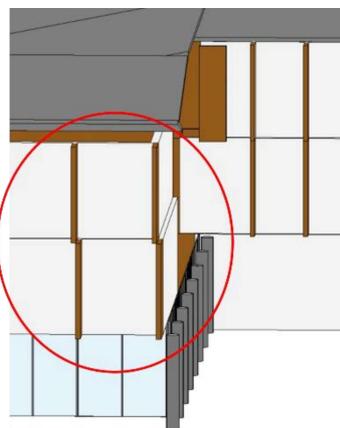
Após a realização das configurações necessárias, a modelagem foi iniciada com base nas plantas arquitetônicas dos pavimentos, disponibilizadas em formato CAD (DWG). A ausência de um projeto estrutural representou um desafio adicional para o processo de modelagem. Conforme ilustrado nas Figuras 82, 83 e 84, foram identificadas inconsistências no alinhamento entre as plantas dos diferentes pavimentos. Para corrigir essas divergências, foi necessário realizar a conferência das medidas diretamente no local.

Figura 82 –
Desalinhamento de
paredes.



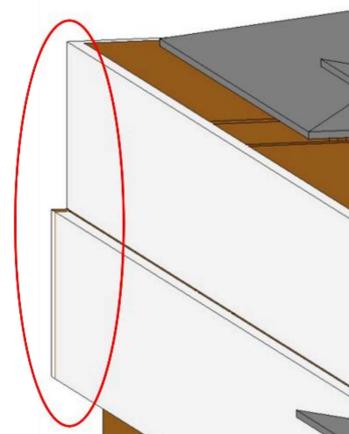
Fonte: Captura de tela do
software Autodesk Revit
(2025), realizada pela autora.

Figura 83 –
Inconsistência estrutural.



Fonte: Captura de tela do
software Autodesk Revit
(2025), realizada pela
autora.

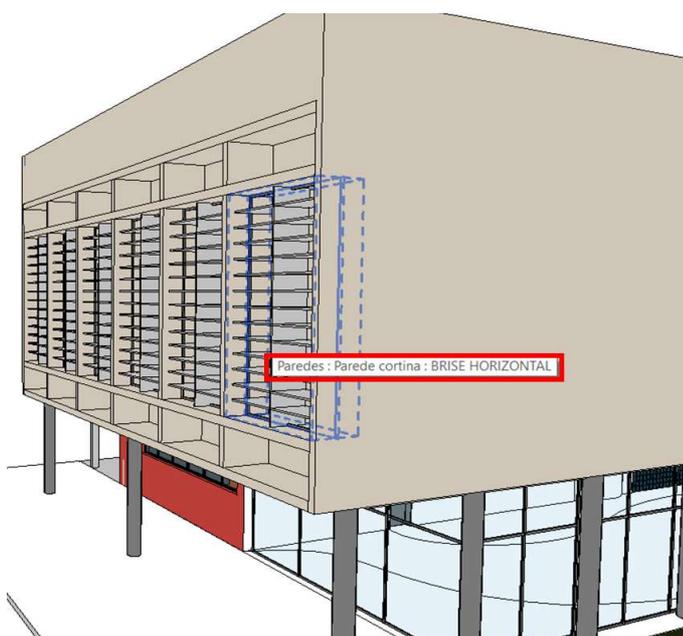
Figura 84 –
Descontinuidade da
fachada.



Fonte: Captura de tela do
software Autodesk Revit
(2025), realizada pela
autora.

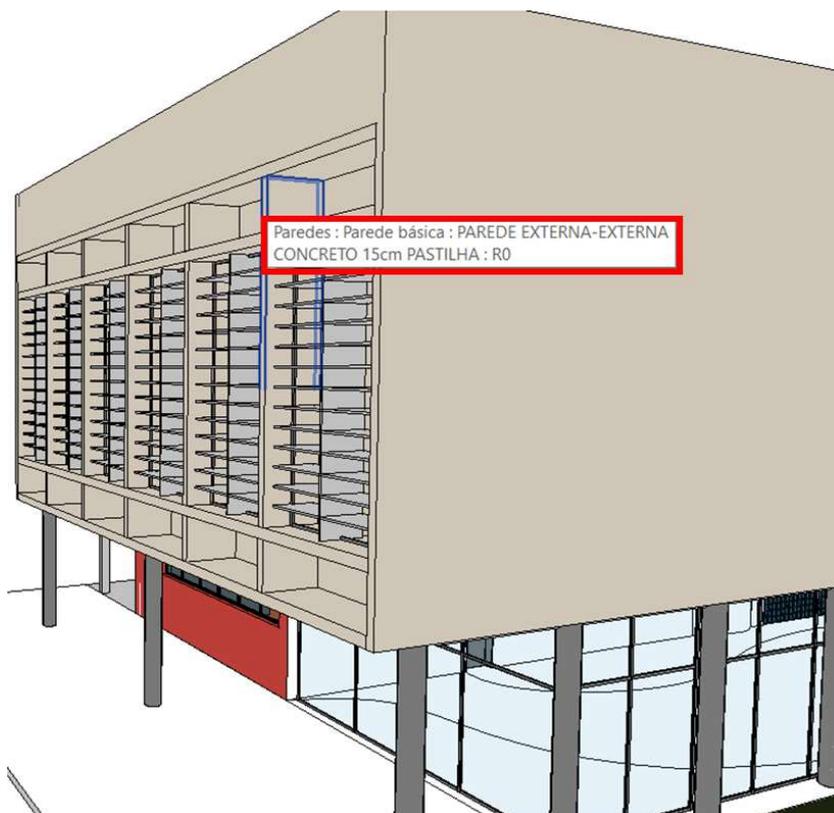
As Figuras 85, 86, 87, 88 e 89 ilustram a modelagem dos *brises* e da marquise inclinada. Os *brises* foram modelados utilizando diferentes abordagens, como parede cortina, parede básica, pisos e agrupamento de elementos em um grupo de modelo. A marquise inclinada foi modelada como um elemento do tipo piso.

Figura 85 – Parte do *brise* do auditório modelado com parede cortina.



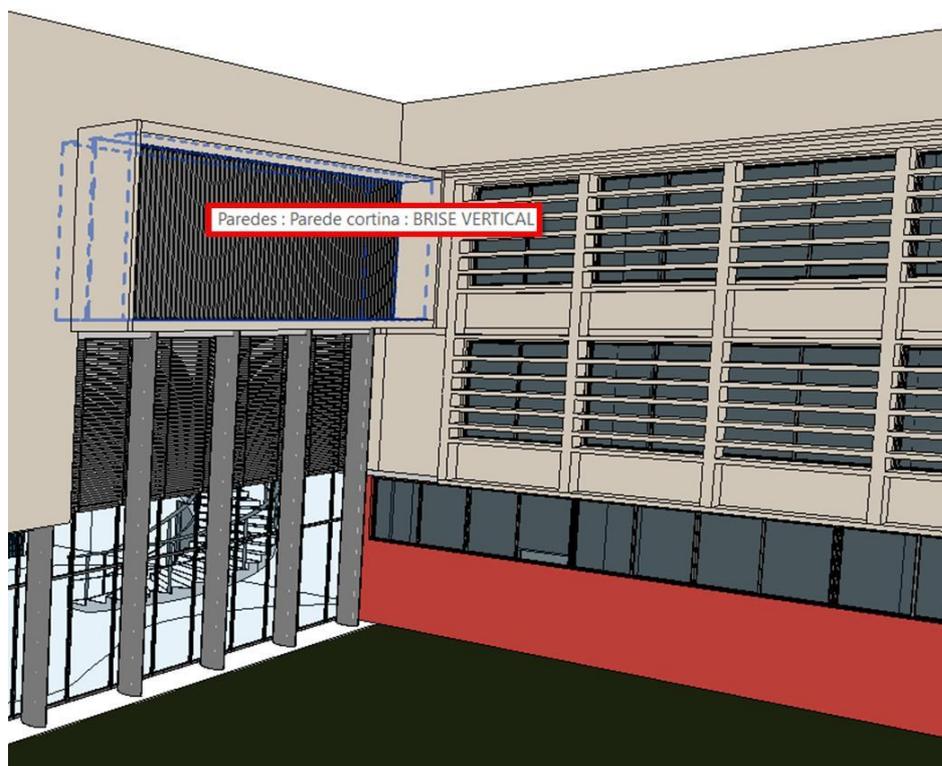
Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 86 – Parte do *brise* do auditório modelado com parede básica.



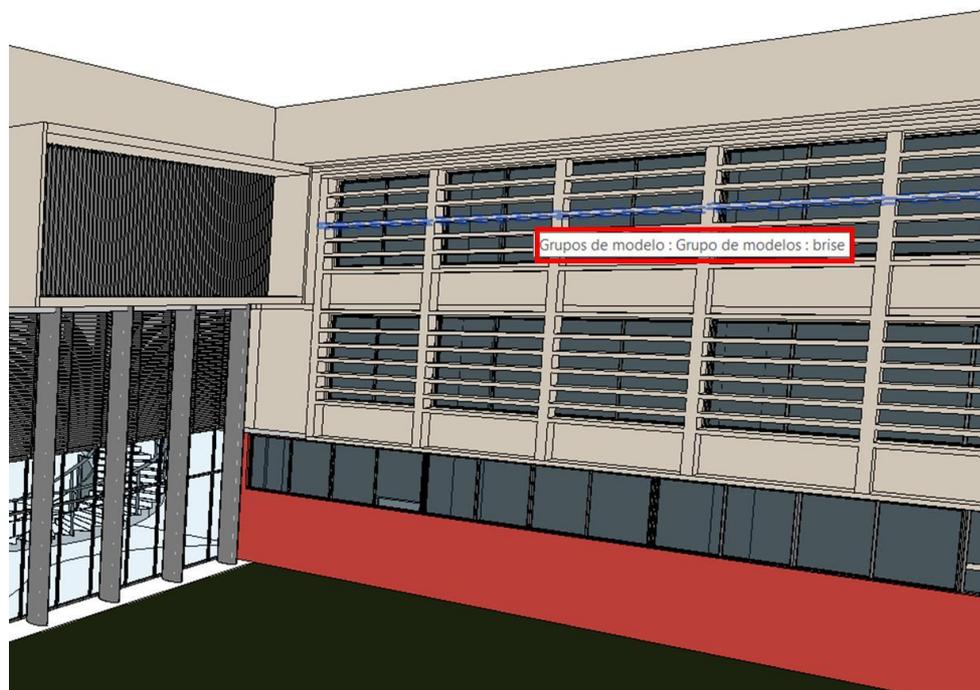
Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 87 – Parte do *brise* modelado com parede cortina.



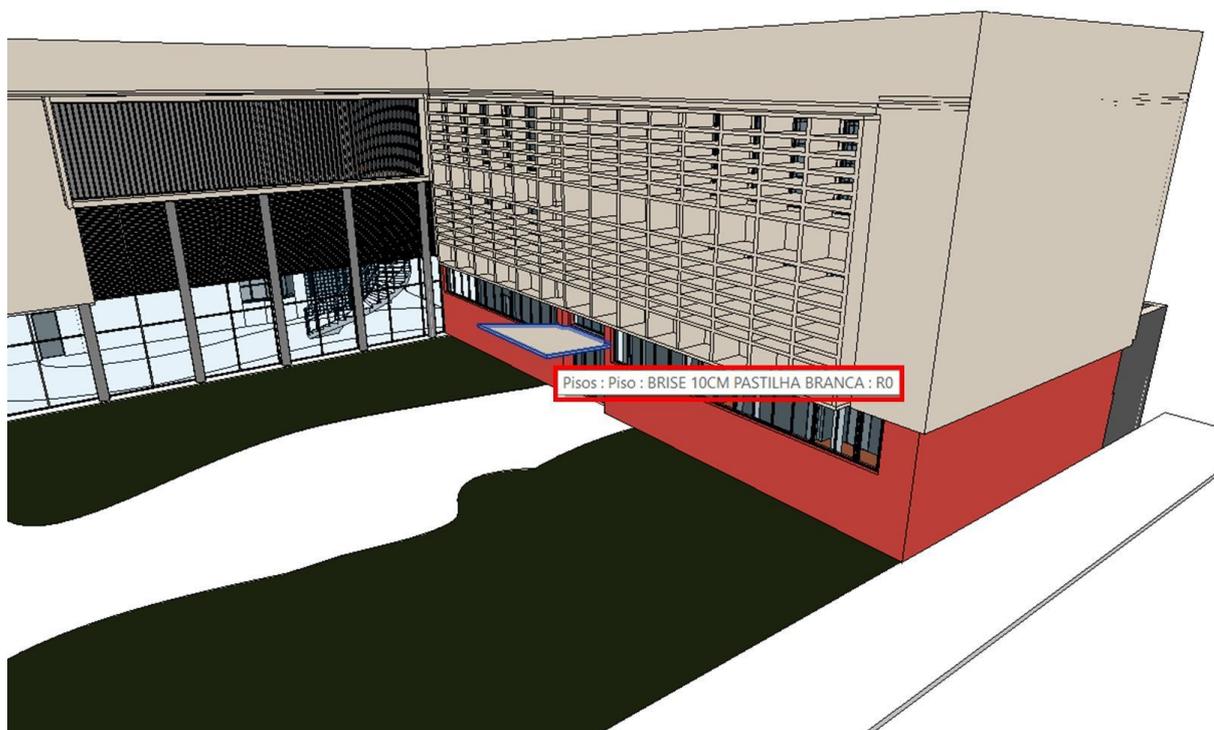
Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 88 – Parte do *brise* modelado por agrupamento de elementos.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 89 – Marquise inclinada modelada com elemento piso.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

As patologias foram registradas exclusivamente no parâmetro "Bom estado de conservação", sem o uso de imagens associadas aos materiais.

A Figura 90 apresenta uma perspectiva externa do modelo da Escola de Arquitetura, enquanto a Figura 91 exibe uma perspectiva do *hall* principal.

Figura 90 – Modelo BIM EA-UFMG – Perspectiva externa.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 91 – Modelo BIM EA-UFMG – Perspectiva *hall* principal.



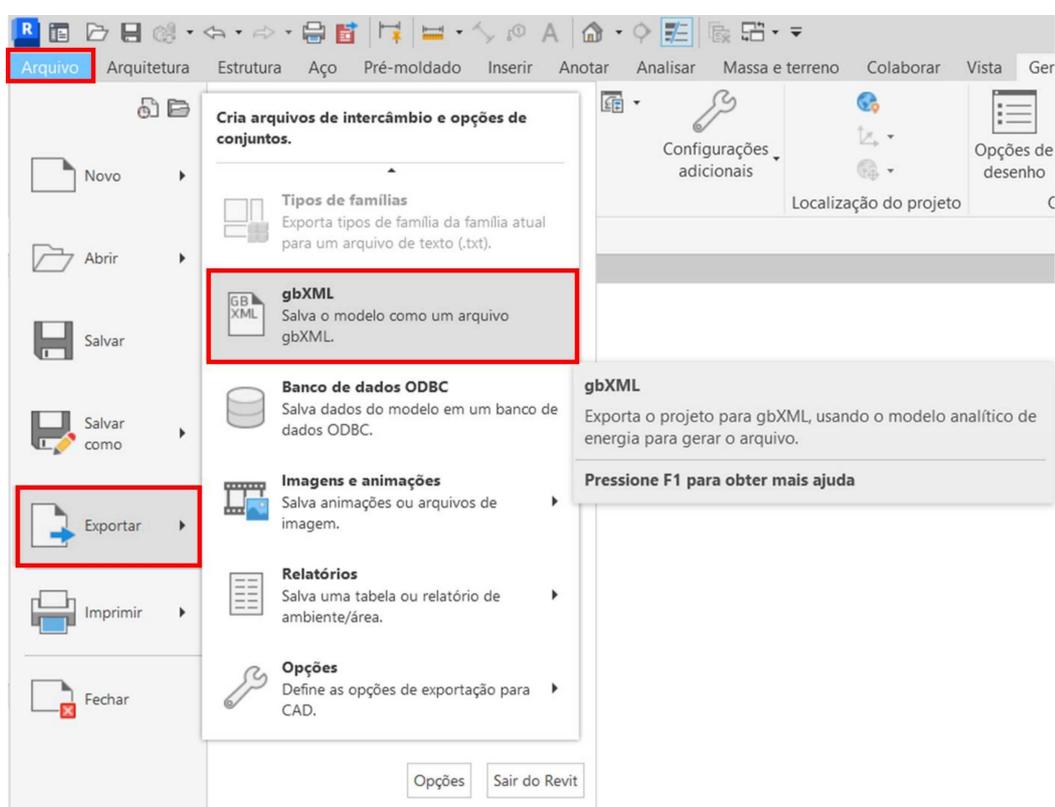
Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

4.3.2 Análise energética do modelo HBIM – Processos e obstáculos

Esta seção apresenta o fluxo de trabalho de interoperabilidade de um modelo HBIM desenvolvido no Revit, utilizando a extensão de projeto RVT, até sua conversão para um arquivo IDF, adequado para simulação no EnergyPlus.

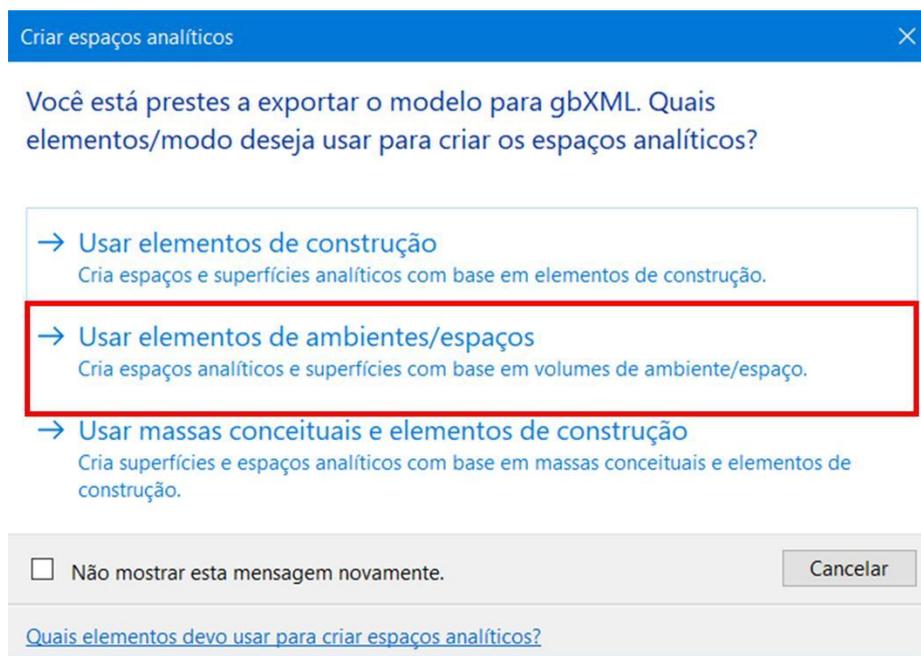
Após a finalização do modelo HBIM, o arquivo RVT foi exportado no formato gbXML por meio do menu principal do Revit (Figura 92). Optou-se por gerar espaços analíticos e superfícies com base nos volumes dos ambientes/espacos (Figura 93).

Figura 92 – Janela de exportação de arquivos do Revit.



Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Figura 93 – Escolha por usar elementos de ambientes/espços.

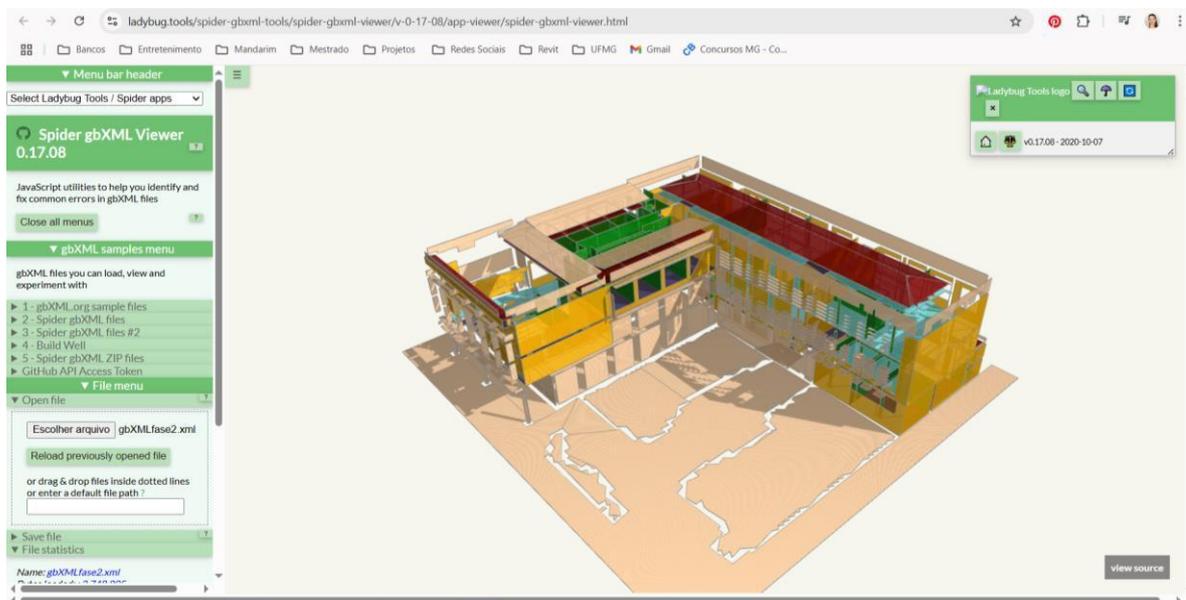


Fonte: Captura de tela do *software* Autodesk Revit (2025), realizada pela autora.

Para identificar erros e verificar a geometria antes da importação do arquivo gbXML para o OpenStudio, o modelo foi carregado no site oficial do gbXML (gbxml.org³). A Figura 94 exibe o resultado da visualização.

³ Esse *site* é um visualizador que faz parte do projeto Spider das ferramentas Ladybug. As ferramentas Ladybug são um conjunto de aplicativos gratuitos (Ladybug, Honeybee, Butterfly e Dragonfly) para análise ambiental e consumo de energia total de edifícios que faz parte do portfólio de projetos de modelagem energética predial do Departamento de Energia dos EUA (Langner, Sacht e Vettorazzi, 2020).

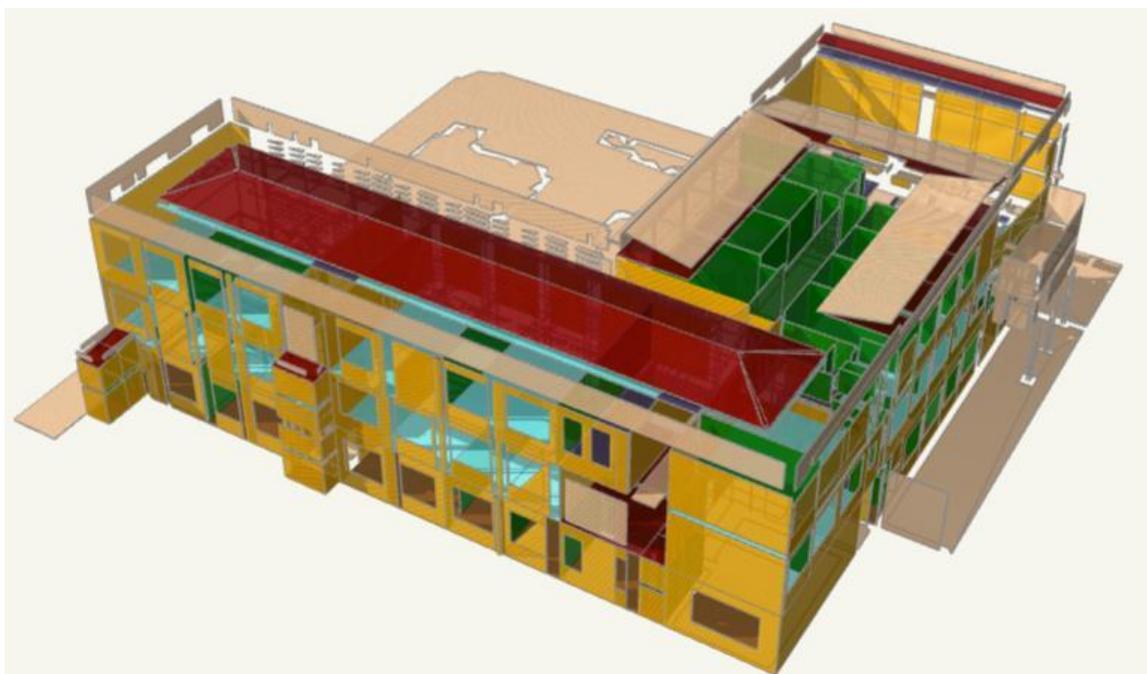
Figura 94 – Resultado do arquivo de energia gbXML no visualizador.



Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

O arquivo apresentou diversas inconsistências geométricas, como mostrado na Figura 95: paredes desconectadas; ausência de alguns telhados e lajes; o programa quantificou 12 tipos de janelas diferentes, mas só apareceram as aberturas; os *brises* também não apareceram de maneira correta, só as partes dos *brises* que foram modeladas como elementos agrupados em grupo de modelo é que apareceram, mas apareceram fragmentados. Foram identificadas 1.023 superfícies com vértices desconectados e 52 espaços com múltiplos problemas (Figuras 96 e 97).

Figura 95 – Falhas no modelo geométrico da EA.



Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

Figura 96 – Verificação de vértices não estanques.

▼ Verifique se há vértices não estanques
~1.023 encontrado

Verifique superfícies com vértices desconectados de outros vértices. Ignore todos os tipos de superfície "Shade". Veja ?/read me para mais detalhes.

1.023 vértices não conectados encontrados.

objetivo0750 ▲
objetivo0750 ●
objetivo0750
objetivo0750
objetivo1011 ▼

Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

Figura 97 – Verificação de espaços não estanques.

▼ Verifique se há espaço não estanqueRefs ~52 encontrado indefinido

52 espaços com possíveis problemas múltiplos encontrados. Este é um trabalho em andamento. É provável que vários falsos positivos sejam encontrados. O espaço na visualização 3D não está sendo exibido.

1-04 Espaço analítico ▲
1-13 Espaço analítico ●
1-03 Espaço analítico
1-02 Espaço analítico
1-07 Espaço analítico ▼

Tempo para verificar: 332,2 ms

Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

Conforme ilustrado na Figura 98 as cores do modelo de energia refletem a interpretação das superfícies pelo *software*. Algumas superfícies foram lidas incorretamente e embora a separação por pavimentos estivesse correta, a área total foi calculada de maneira equivocada devido à leitura incorreta dos pisos (Figura 99).

Figura 98 – Cores das superfícies configuradas no visualizador gbXML.org.



Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

Figura 99 – Cálculo de área dos pavimentos.

0 m / PAVTO 01 - TÉRREO
3,9 m / PAVTO 02
7,5 m / PAVTO 03
11,2 m / Cobertura

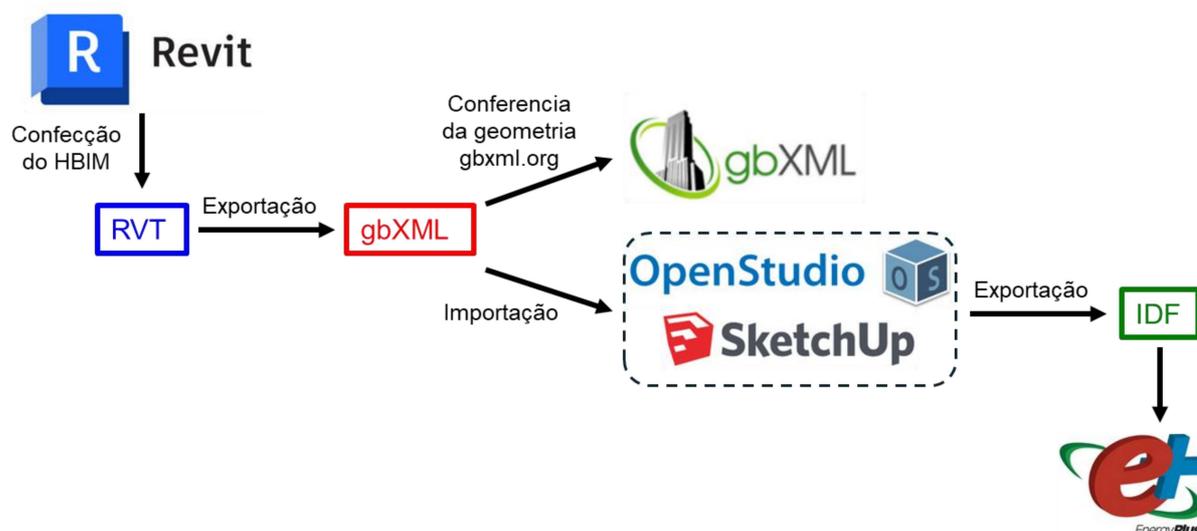
Fonte: Captura de tela do visualizador gbXML.org, realizada pela autora.

Quanto ao reconhecimento dos materiais, 36 materiais foram transferidos para o modelo de energia.

Nesta etapa, identificou-se que havia desafios significativos de interoperabilidade, os quais poderiam comprometer a viabilidade da simulação energética do modelo HBIM. Embora o visualizador gbXML permita a correção de alguns problemas, o volume de inconsistências tornou esse processo impraticável. Além disso, a realização de modificações externas ao modelo BIM comprometeria a integridade do fluxo de trabalho, que pressupõe centralização e consistência das informações.

Após essa etapa, o arquivo gbXML exportado do Revit foi importado para o OpenStudio (versão 1.4) e convertido em IDF. Em seguida, foi aberto no EnergyPlus para a execução da simulação termoenergética. A Figura 100 ilustra o fluxo de trabalho de interoperabilidade adotado neste estudo.

Figura 100 – Fluxo de trabalho de interoperabilidade.



Fonte: A autora.

O OpenStudio é um conjunto de ferramentas para modelagem energética de edificações (BEM) que oferece uma interface gráfica para o EnergyPlus, tornando sua utilização mais acessível ao traduzir sua complexidade para uma interface visual intuitiva (Attia, 2011).

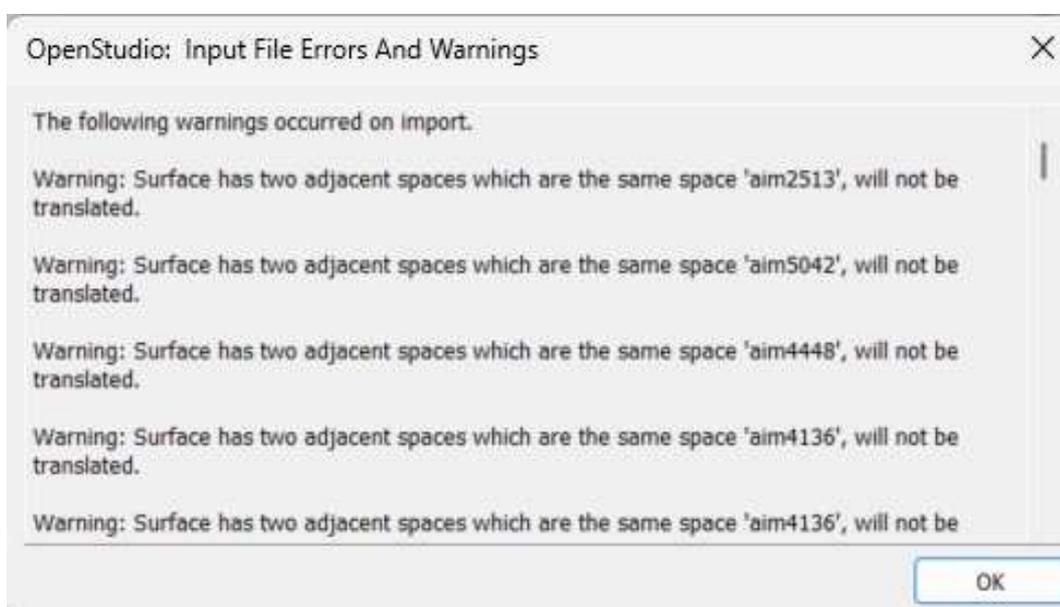
Dentre seus recursos, destaca-se o *plug-in* gratuito Legacy OpenStudio, que integra o EnergyPlus ao SketchUp, uma plataforma amplamente utilizada para modelagem arquitetônica. Com essa integração, é possível criar e modificar zonas e superfícies de forma visual, atribuir materiais e exportar os dados diretamente para o EnergyPlus. Isso facilita o uso do EnergyPlus, que possui uma interface complexa, que mais se assemelha a uma planilha de dados do que a uma interface gráfica. No Energy Plus a geometria da edificação deve ser inserida através de coordenadas numéricas (EnergyPlus, 2025).

A interface do *plug-in* no SketchUp parece com o visualizador gbXML descrito anteriormente. Porém, através do OpenStudio é possível exportar o modelo para o formato IDF (*Input Data File*), compatível com o EnergyPlus, visualizando os resultados sem sair do SketchUp. Para isso o usuário deve executar o visualizador de resultados do próprio OpenStudio para receber os resultados da simulação, que são básicos e com vários formatos de saída (Attia, 2011).

Ao abrir o modelo no OpenStudio, foram exibidos vários avisos de erro, principalmente relacionados à geometria e à definição das zonas.

A Figura 101 mostra um erro relacionado a superfícies com espaços adjacentes. Essa mensagem de erro indica que o OpenStudio encontrou um problema na geometria do modelo. Especificamente, o *software* está indicando que algumas superfícies estão definidas como tendo dois espaços adjacentes que são, na verdade, o mesmo espaço. Isso geralmente acontece quando paredes ou outras superfícies não estão conectadas corretamente no modelo 3D ou quando há duas paredes sobrepostas. Provavelmente, o *software* está considerando as camadas de uma parede (tijolo, argamassa, tinta etc.) como sendo várias paredes.

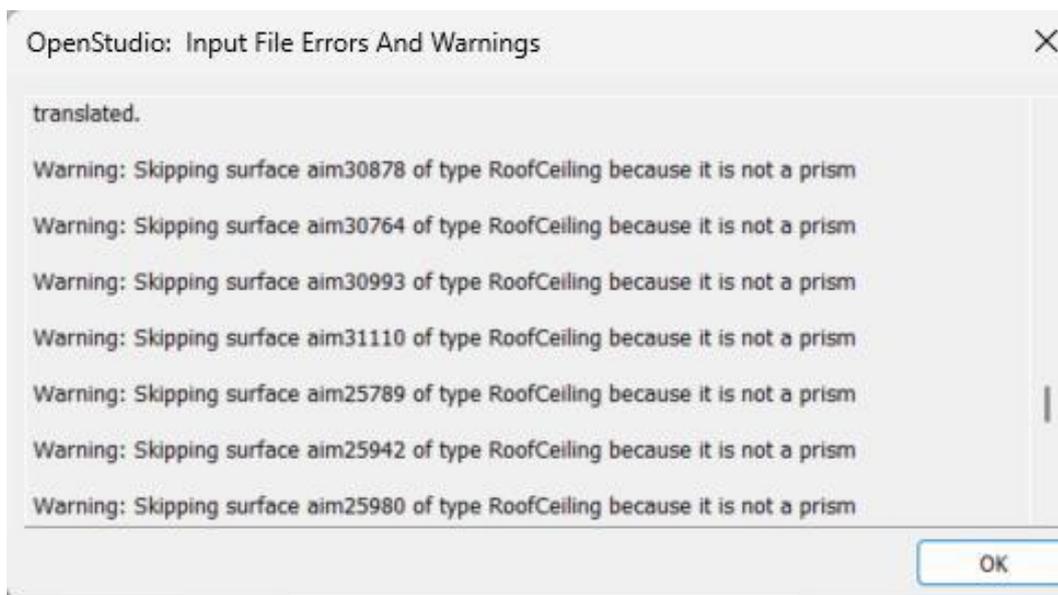
Figura 101 – Erros de superfície com espaços adjacentes.



Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

Outro erro identificado foi a incapacidade do *software* de processar superfícies que não sejam prismáticas, como superfícies curvas, o que pode comprometer a precisão da simulação térmica (Figura 102) (OpenStudio, 2025).

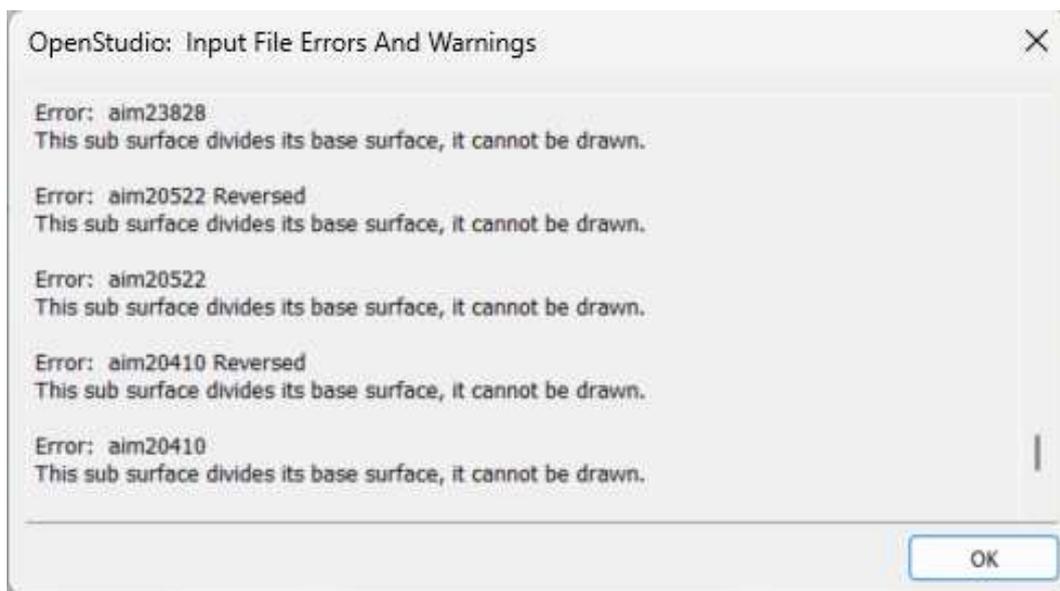
Figura 102 – Ignorando superfície porque não é um prisma.



Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

Mais um erro de identificação de superfícies que apareceu é o da Figura 103. Essa mensagem de erro indica que o OpenStudio está encontrando subsuperfícies (como janelas ou portas) que dividem suas superfícies base de forma inadequada ou que a orientação da subsuperfície está incorreta. As subsuperfícies não podem dividir completamente suas superfícies base, elas precisam estar contidas dentro dos limites da superfície base. Se uma subsuperfície se estende além dos limites da superfície base, ou se a divide em duas ou mais partes separadas, o OpenStudio não consegue processá-la corretamente (OpenStudio, 2025). Em um contexto de modelagem 3D em *softwares* como o OpenStudio, "superfícies base" referem-se às superfícies principais de um objeto ou ambiente, às quais outras superfícies menores (as "subsuperfícies") são associadas. Para exemplificar, considera-se a parede como "superfície base" e as janelas ou portas como as "subsuperfícies". Provavelmente esse erro também foi devido à construção dos elementos construtivos compostos por camadas.

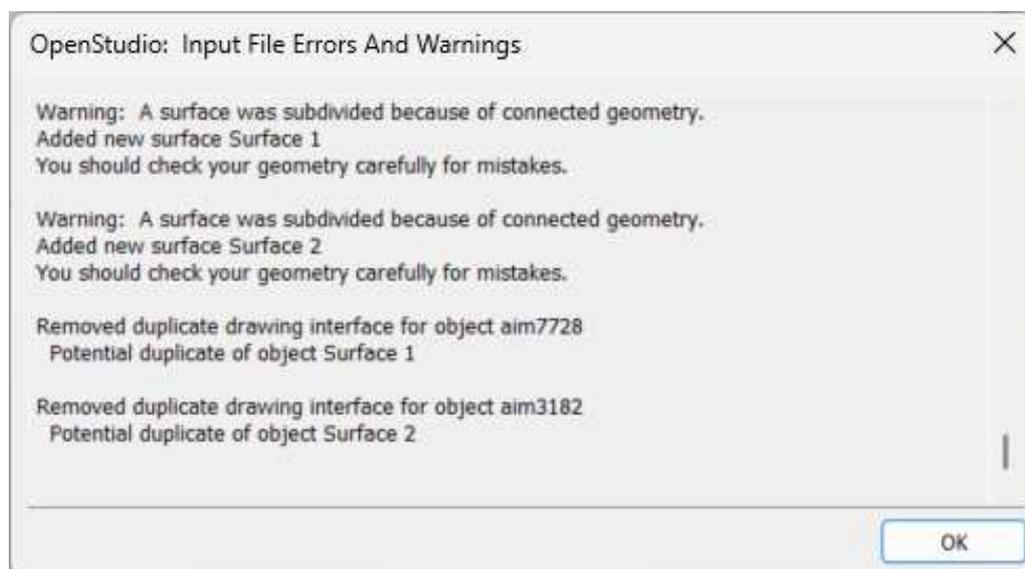
Figura 103 – Erro relacionado à divisão de superfície base.



Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

A Figura 104 mostra outro erro que está relacionado a superfícies subdivididas devido à geometria conectada e objetos duplicados que foram removidos automaticamente pelo *software*. O OpenStudio subdividiu algumas superfícies devido à geometria conectada. Isso geralmente acontece quando as superfícies se encontram de forma complexa ou quando há inconsistências na conexão das superfícies.

Figura 104 – Erro relacionado a superfícies subdivididas e objetos duplicados.



Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

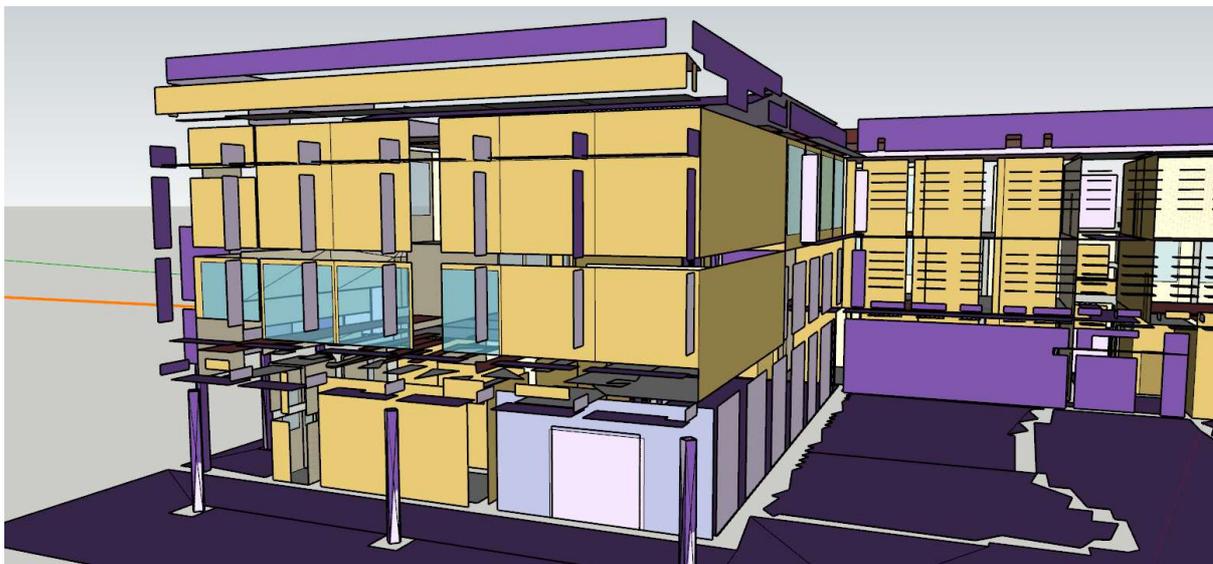
Além dos erros destacados, outros problemas foram identificados. Assim como no visualizador gbXML, elementos construtivos como pisos e paredes não foram corretamente transferidos, conforme ilustrado na Figura 105.

Figura 105 – Erro de geometrias desconsideradas na exportação.



Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

Elementos foram exportados com categorias erradas (ex.: pisos foram classificados como telhados); paredes internas estavam sendo indicadas como externas; todos os materiais e elementos foram renomeados de forma aleatória, dificultando a identificação deles; superfícies curvas apresentaram distorções ou nem ao menos foram exportadas, prejudicando a precisão do modelo (ex.: desenho do piso do hall de entrada, parede do auditório, colunas da fachada principal); elementos de vidro das paredes cortinas foram transformados em “*shades*” (áreas sombreadas). Quanto aos *brises*, aqueles modelados como piso, apresentaram geometrias incorretas e por outras vezes não foram exportados corretamente. Já os representados com paredes cortinas não foram exportados (Figura 106).

Figura 106 – Erro na exportação de *brises*.

Fonte: Captura de tela do *plug-in* OpenStudio no SketchUp, realizada pela autora.

Pilares e colunas também não foram exportados corretamente. As colunas da fachada principal tiveram sua geometria alterada de circular para retangular. Além disso, algumas paredes foram fragmentadas ou simplesmente não foram exportadas.

Diante desses problemas, constatou-se que a quantidade de erros inviabilizou a continuidade da simulação energética do modelo.

4.3.3 Decisão de interromper a simulação

Ao executar o arquivo IDF no EnergyPlus para a simulação termoenergética, a execução foi imediatamente interrompida pelo *software* devido a erros críticos, o que já era esperado conforme descrito na seção anterior. Dessa forma, não foram acrescentadas as demais informações no EnergyPlus como, por exemplo, o arquivo climático e o estabelecimento de rotinas.

Embora o EnergyPlus permita a correção de alguns erros diretamente no programa, a grande quantidade de inconsistências geométricas exigiria uma reestruturação completa do modelo HBIM. A complexidade do modelo dificultou a identificação e o ajuste das superfícies, tornando inviável a correção pontual dos problemas.

Para viabilizar a simulação, seria necessário excluir diversos parâmetros associados aos materiais e aos elementos construtivos, além de simplificar

significativamente a modelagem dos componentes (paredes, lajes, *brises* e esquadrias). Isso incluiria a remoção das camadas das paredes e lajes, bem como a modelagem dos *brises* e esquadrias da forma mais simples possível, sem nenhuma atribuição de propriedades de materiais. No entanto, essa simplificação extrema descaracterizaria o modelo histórico, comprometendo a fidelidade da análise. Assim, não há justificativa para prosseguir com essa abordagem simplificada.

5 RESULTADOS

A produção do modelo HBIM da Escola de Arquitetura e Urbanismo da UFMG transcorreu de forma satisfatória no que se refere à representação geométrica da edificação e à parametrização das condições de conservação dos componentes. Elementos como os *brises* apresentaram maior complexidade, demandando mais tempo e atenção, mas foram modelados com êxito.

Contudo, ao inserir dados termoenergéticos no modelo, surgiram desafios que também foram amplamente relatados na literatura. A adição de propriedades térmicas nos elementos construtivos se mostrou um processo sensível. No Revit, observou-se que certos parâmetros possuem vínculos internos: ao definir, por exemplo, a absorvância (absorção), o *software* preenche automaticamente a transmitância térmica (coeficiente de transferência de calor), gerando valores discrepantes em relação aos adotados no método prescritivo da etiquetagem ENCE da edificação. Essa dependência entre parâmetros, sem a possibilidade de total customização pelo usuário, limita a precisão dos dados inseridos e compromete a fidelidade do modelo à realidade física da edificação, um desafio também identificado por Kamel e Memari (2019), que discutem as limitações dos *softwares* BIM em armazenar ou transferir corretamente todas as informações para a simulação energética.

Após a finalização do modelo HBIM no Revit, foi realizada a exportação para o formato gbXML, visando sua posterior utilização no EnergyPlus por meio do OpenStudio. No entanto, ao abrir o arquivo exportado, tanto no visualizador gbXML.org quanto no *plug-in* OpenStudio para SketchUp, foram identificados erros graves de geometria. Os volumes estavam distorcidos, com paredes sobrepostas e zonas térmicas incorretamente definidas, resultando na descaracterização do edifício. Situação semelhante foi relatada por Massafra *et al.* (2023), que também enfrentaram problemas de interoperabilidade ao tentar exportar modelos do Revit para o EnergyPlus, sendo forçados a desenvolver um BEM separado fora do fluxo BIM.

Uma das premissas fundamentais do BIM é justamente a redução de retrabalhos e a promoção do trabalho colaborativo por meio da interoperabilidade. A exportação do modelo em diferentes extensões tem como objetivo evitar a necessidade de remodelagem da edificação no *software* EnergyPlus, bem como a reinserção de informações relativas às propriedades térmicas, padrões de ocupação, localização do edifício e outros dados já incorporados no modelo HBIM.

Essa falha de interoperabilidade comprometeu os objetivos centrais da proposta: realizar a simulação energética com base no modelo HBIM, sem necessidade de remodelagem. A proposta de integração entre HBIM e BEM, recomendada por diversos autores da RSL, como Piselli *et al.* (2020a, 2020b), Meoni *et al.* (2022) e Cinquepalmi *et al.* (2023), mostrou-se desafiadora em um contexto de equipe reduzida e sem suporte em programação visual ou customizações via Dynamo ou Grasshopper.

A tentativa de simplificar o modelo para torná-lo compatível com o EnergyPlus implicaria a exclusão de informações cruciais, como a composição real das paredes e o estado de conservação dos elementos, comprometendo não apenas a precisão energética, mas também a integridade patrimonial. Esse impasse evidencia um ponto crítico discutido por Lucchi e Agliata (2023): o equilíbrio entre fidelidade histórica e funcionalidade técnica.

Em virtude dessas limitações, optou-se por não prosseguir com a simulação energética, pois isso implicaria a utilização de um modelo excessivamente simplificado, que não refletiria adequadamente as condições reais da edificação nem permitiria a avaliação de intervenções de retrofit que respeitem os atributos patrimoniais. A decisão de documentar essas limitações, em vez de forçar uma simulação com resultados comprometidos, segue o princípio ético da pesquisa aplicada e contribui para o campo ao revelar os entraves práticos da integração entre HBIM e BEM em contextos com recursos limitados.

Ao contrastar os achados desta pesquisa com os da RSL, observa-se que os estudos com maior sucesso na integração HBIM-BEM contaram com equipes interdisciplinares e suporte técnico especializado (TI, engenharia de dados, programação), além de plataformas externas desenvolvidas sob medida para viabilizar a comunicação entre *softwares*, como demonstrado por Nagy e Ashraf (2021) e Etxepare *et al.* (2020). Em contraste, esta pesquisa expôs os limites dessa integração quando aplicada em cenários com infraestrutura e equipe técnica reduzidas, realidade comum na prática brasileira de gestão patrimonial.

Portanto, ainda que a simulação não tenha sido viabilizada, os resultados obtidos são valiosos, pois:

- Comprovam a viabilidade da modelagem HBIM em contextos de baixa complexidade técnica e orçamentária;

- Evidenciam barreiras práticas à interoperabilidade, confirmando achados recorrentes da RSL;
- Contribuem para o mapeamento de limitações que precisam ser superadas para uma adoção mais ampla do HBIM-BEM.

Esses achados reforçam a necessidade de desenvolvimento de fluxos de trabalho simplificados e adaptáveis, que permitam análises energéticas consistentes sem renunciar à preservação dos atributos históricos, uma lacuna ainda pouco explorada na literatura, mas essencial para ampliar a aplicabilidade do BIM em edificações históricas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para alcançar maior eficiência energética no setor da construção, é essencial integrar a análise energética às edificações históricas. No entanto, projetos de intervenção nesse tipo de edificação apresentam desafios significativos, especialmente na coleta e sistematização de dados sobre o edifício e seus elementos. Esses dados são fundamentais para a proposição de estratégias de melhoria do desempenho térmico e energético que respeitem sua trajetória histórica, seu contexto urbano, seu clima, sua materialidade e suas características arquitetônicas.

Diante desse cenário, esta pesquisa propôs o uso do BIM, amplamente adotado em projetos de novas edificações, para empreender a análise energética nas edificações históricas, com foco na envoltória. Para investigar a viabilidade dessa abordagem, realizou-se uma revisão sistemática da literatura seguida de um estudo de caso.

A revisão evidenciou o potencial do BIM na análise da eficiência energética de edificações históricas, apesar dos desafios de interoperabilidade frequentemente mencionados. Em muitos casos, esses desafios foram contornados por meio de programações externas ao modelo BIM. A revisão também apontou que o Revit é o *software* mais utilizado para a modelagem HBIM, enquanto o EnergyPlus é o mais recomendado para a análise energética. Com base nessas informações, foi desenvolvido o estudo de caso no Bloco L da Escola de Arquitetura e Urbanismo da UFMG, uma edificação histórica que já possui etiquetagem ENCE, possibilitando a comparação dos resultados da simulação computacional com os obtidos pelo método prescritivo.

O HBIM desenvolvido no Revit demonstrou grande potencial para o registro e documentação de edificações históricas, permitindo a incorporação de diversos parâmetros que podem ser atualizados ao longo do ciclo de vida do edifício. Nesta pesquisa, optou-se por uma modelagem simplificada, considerando apenas a disciplina arquitetônica, embora outras disciplinas, como hidráulica e elétrica, pudessem ser integradas ao modelo. No entanto, devido às dificuldades de interoperabilidade apontadas na literatura, a modelagem foi limitada a um LOD 300, incluindo apenas os parâmetros energéticos exigidos pelo método prescritivo do RTQ-C e um parâmetro adicional para caracterização do estado de conservação dos materiais de revestimento.

O processo de exportação do modelo HBIM para análise energética revelou os mesmos problemas de interoperabilidade relatados na literatura. Apesar das vantagens do Revit em relação a outros *softwares* de modelagem, como o SketchUp, verificou-se que a adição de informações detalhadas ao modelo aumenta a probabilidade de perda de dados e erros durante a exportação para o EnergyPlus. Além disso, as configurações de energia predefinidas do Revit, que poderiam facilitar a criação dos modelos energéticos e reduzir erros manuais, não são efetivamente aproveitadas no fluxo de trabalho com o EnergyPlus. A perda significativa de informações durante a conversão entre formatos reforça a necessidade de aprimoramento da integração entre ferramentas BIM e BEM.

A principal contradição observada é que os mesmos parâmetros que permitiriam uma análise conjunta das restrições patrimoniais e das possibilidades de melhoria energética são os que mais prejudicam a interoperabilidade entre o *software* BIM e a ferramenta de simulação termoenergética. Para que a simulação fosse possível, o modelo HBIM precisaria ser extremamente simplificado, sem adição de parâmetros personalizados, utilizando apenas os dados automáticos do Revit. Isso, porém, comprometeria o propósito do HBIM como ferramenta de documentação histórica, tornando-o apenas um modelo tridimensional genérico, algo que poderia ser realizado de maneira mais eficiente por outros *softwares* fora do fluxo BIM.

Atualmente, o BEM ainda não está suficientemente integrado ao fluxo digital do BIM, impedindo um aproveitamento contínuo das informações do modelo. As ferramentas de simulação energética exigem que os dados sejam inseridos manualmente, mesmo quando já estão disponíveis no modelo BIM. Além disso, o EnergyPlus, amplamente recomendado na literatura, apresenta uma interface pouco intuitiva e um processo de edição de dados complexo, demandando precisão absoluta nas informações de entrada.

Os resultados desta pesquisa demonstram que a metodologia baseada na simulação computacional a partir de um modelo HBIM não é capaz de reproduzir fielmente os resultados do método prescritivo do RTQ-C. A simulação só é viável com um modelo energético simplificado, o que limita sua relevância no contexto da preservação patrimonial. Assim, a abordagem mais adequada ainda é analisar separadamente as questões patrimoniais e as estratégias de melhoria energética.

Embora alguns estudos tenham desenvolvido soluções personalizadas, como programações específicas para converter dados entre *softwares*, essa abordagem

contraria o princípio do BIM de centralização das informações em um único modelo. Os desafios encontrados nesta pesquisa reforçam a necessidade de novos estudos que aproximem as áreas de preservação patrimonial e análise energética, permitindo o desenvolvimento de ferramentas confiáveis para a tomada de decisão sobre a eficiência energética de edificações históricas.

A interoperabilidade continua sendo um dos maiores desafios do BIM, pois, sem a comunicação eficiente entre os *softwares*, o fluxo de trabalho BIM perde sua eficiência, resgatando características arcaicas e pouco produtivas associadas ao CAD.

Apesar dessas dificuldades, esta pesquisa reafirma o potencial futuro do HBIM na documentação e análise energética de edificações históricas, bem como a necessidade de avanços na interoperabilidade com ferramentas BEM. A metodologia BIM representa um caminho sem volta para o setor AEC, e seu aprimoramento contribuirá significativamente para a integração da preservação patrimonial com a eficiência energética.

6.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os resultados desta dissertação evidenciaram o potencial do uso do HBIM na documentação e modelagem de edificações históricas, mas também revelaram limitações significativas no processo de integração entre o HBIM e os *softwares* de simulação energética (BEM), especialmente no que se refere à interoperabilidade, à fidelidade geométrica e à preservação dos atributos patrimoniais da edificação. A tentativa de aplicar essa integração em um contexto com equipe reduzida e recursos limitados mostrou-se desafiadora, o que evidencia a necessidade de aprofundamentos futuros que consolidem fluxos metodológicos mais robustos e adaptáveis à realidade brasileira.

Nesse sentido, propõem-se as seguintes recomendações para trabalhos futuros:

I. Desenvolvimento de um protocolo metodológico de integração entre HBIM e BEM

A principal contribuição a ser aprofundada em pesquisas futuras é a formulação de um protocolo estruturado de integração entre HBIM e BEM, capaz de orientar a

realização de simulações energéticas em edificações históricas sem comprometer os valores patrimoniais. Esse protocolo deve prever os níveis de detalhamento ideais para a modelagem histórica, os formatos de interoperabilidade mais adequados (como IFC ou gbXML), e estratégias para evitar a perda de informações na exportação de dados para *softwares* de simulação como o EnergyPlus e o DesignBuilder.

II. Investigação sobre estratégias de simplificação do modelo HBIM sem perda de confiabilidade

Considerando que modelos HBIM com alto nível de detalhamento frequentemente apresentam problemas na exportação para *softwares* de simulação, recomenda-se a investigação de estratégias de simplificação controlada do modelo. Isso inclui identificar quais informações são essenciais para garantir simulações energéticas confiáveis e quais podem ser representadas de forma mais sintética sem prejuízo da análise termoenergética ou da preservação patrimonial.

III. Aplicação em diferentes tipologias e contextos climáticos

A metodologia aplicada nesta pesquisa se restringiu a uma edificação modernista, localizada na região Sudeste do Brasil. Sugere-se, portanto, a aplicação futura do protocolo em diferentes tipologias arquitetônicas e contextos climáticos, a fim de validar sua adaptabilidade e robustez. Edificações coloniais, neoclássicas ou vernaculares, por exemplo, podem apresentar desafios específicos tanto na modelagem quanto na simulação energética, exigindo ajustes metodológicos.

IV. Integração com dados reais de consumo energético e etiquetagem

Outro caminho promissor para pesquisas futuras é a validação empírica dos modelos energéticos gerados a partir do HBIM por meio da comparação com dados reais de consumo energético ou com etiquetas oficiais, como a ENCE. Essa comparação pode indicar o grau de precisão das simulações realizadas e contribuir para ajustes no protocolo proposto.

V. Ampliação do uso de rotinas automatizadas e programação visual

A literatura e a experiência desta pesquisa indicam que a interoperabilidade entre *softwares* é um dos principais entraves à integração HBIM e BEM. Nesse contexto, recomenda-se o investimento em rotinas automatizadas e programação

visual (por exemplo, Dynamo, Grasshopper ou *scripts* em Python), que auxiliem na extração, organização e exportação de dados do modelo HBIM para a simulação energética. Além de reduzir erros, essas ferramentas podem acelerar o processo de modelagem e análise.

VI. Proposição de diretrizes para políticas públicas e práticas institucionais

Considerando a urgência da transição energética no setor da construção e o potencial do HBIM para orientar decisões de retrofit sustentável, é recomendável que trabalhos futuros também se voltem para a proposição de diretrizes normativas e institucionais que incorporem a modelagem energética no processo de gestão e intervenção em edificações históricas. Isso inclui recomendações para editais de restauro, normas técnicas e práticas de licenciamento que considerem a análise energética como parte integrante do diagnóstico e das propostas de intervenção.

REFERÊNCIAS

ABDI - AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Avaliação de Desempenho Energético em Projetos BIM**: Coletânea guias BIM ABDI-MDIC. BRASÍLIA: ABDI, 2017. v. 5; p. 22 ISBN 978-85-61323-47-9.

ABDULLAH, O.; HATEM, W. Alternative Construction using BIM in Old Educational Buildings. **Engineering Technology & Applied Science Research**, v. 13, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.48084/etasr.5390>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

ABDULLAH, O.; HATEM, W. The use of BIM to propose alternative construction methods to reduce the cost of energy for the historic archeological building in Iraq. **Archives of Civil Engineering**, v. 69, 2023b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.24425/ace.2023.145283>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

AFONSO, M. *et al.* Como construir conhecimento sobre o tema de pesquisa? Aplicação do processo ProKnow-C na busca de literatura sobre avaliação do desenvolvimento sustentável. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 5, n. 2, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.24857/rgsa.v5i2.424>. Acesso em: 21 de maio de 2023.

ALMEIDA, M. **Perfil profissional no LinkedIn**. Disponível em: <https://www.linkedin.com/in/mafalmeida/>. Acesso em: 31 janeiro de 2025.

ALSAID, A. *et al.* Methodology to Improve Energy Efficiency of Heritage Buildings Using HBIM - Sabil Qaitbay: A Case Study from Egypt. **Civil Engineering and Architecture**, v. 11, 2023. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85145374917&doi=10.13189%2fcea.2023.110134&partnerID=40&md5=e3a285ae0b56c77b8d15687d7c5db4c5>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

AMERICAN INSTITUTE OF ARCHITECTS (AIA). **Project Building Information Modeling Protocol Forms**. EUA, 2013. Disponível em: <https://architectis.it/onewebmedia/AIA%20C2%AE%20Document%20G202TM%20%E2%80%93%202013.pdf>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

ANSI/ASHRAE (2017), **Standard 140 Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs**. Disponível em: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20errata/standards/140_2017_a_20200901.pdf. Acesso em: 26 de novembro de 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 19650-1**: Organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) - Gestão da informação usando modelagem da informação da construção. Parte 1: Conceitos e princípios. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 19650-2**: Organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) - Gestão da informação usando a modelagem da informação da construção. Parte 2: Fase de entrega de ativos. Rio de Janeiro, 2022.

ATTIA, S. **State of the art of existing early design simulation tools for net zero energy buildings**: a comparison of ten tools. Louvain La Neuve, 2011. Disponível em: http://www-climat.arch.ucl.ac.be/s_attia/attia_nzeb_tools_report.pdf. Acesso em: 15 de março de 2025.

AUTODESK. **Launch into BIM with the fundamentals**. Disponível em: <https://www.autodesk.com/industry/revit-trial>. Acesso em: 12 março 2025.

AZEVEDO, N.; TAVARES, S. Interoperabilidade entre as ferramentas Revit e OpenStudio para simulação termoenergética. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8653783>. Acesso em: 16 de agosto de 2023.

BARROSO, A., BALARINE, A., JESUS, L., CONDE, K. Interoperabilidade entre softwares BIM e BEM para fins de geração de modelos para simulação termoenergética. **XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC**, Porto Alegre, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/entac.v18i.738>. Acesso em: 08 de março de 2023.

BELO HORIZONTE (Minas Gerais). **Lei Orgânica do Município de Belo Horizonte, promulgada em 21 de março de 1990**. Belo Horizonte: Câmara Municipal de Belo Horizonte, 1990. Disponível em: <https://www.cmbh.mg.gov.br/atividade-legislativa/pesquisar-legislacao/lei-organica>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

BELO HORIZONTE (Minas Gerais). **Processo n. 01-182721-08-47**, 2 dezembro, 2008. Processo de Preservação/Tombamento da Escola de Arquitetura da UFMG. Dossiê histórico-cultural e arquitetônico - Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, p. 305, 2008.

BETIM, R. **Bim na reabilitação energética de edifícios comerciais**. Aplicação a sistemas de climatização. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Reabilitação de Edifícios da Universidade Novas de Lisboa), Lisboa, 2022. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/148844/1/Betim_2022.pdf. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

BEVILACQUA, M. *et al.* The horizon europe buildchain project presentation: trustworthy building life-cycle knowledge graph for sustainability and energy efficiency. **SciRes-IT-Scientific Research and Information Technology**, v. 13, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2423/i22394303v13n2p137>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

BRASIL. **Ministério da Economia. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro.** Portaria Inmetro nº 309, de 21 de julho de 2022. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Eficiência Energética de Edificações – RAC Edificações. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 22 jul. 2022. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI/INI-C_Portaria_309_de_2022.pdf. Acesso em: 14 de fevereiro de 2024.

BRASIL. **Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – Inmetro.** Portaria Inmetro nº 372, de 17 de setembro de 2010. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 20 set. 2010. Disponível em: https://pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/Port372-2010_RTQ_Def_Edificacoes-C_rev01.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2024.

CALCERANO, F. *et al.* Energy and environmental improvement of built heritage: HBIM simulation-based approach applied to nine Mediterranean case-studies. **Building Research and Information**, v. 52, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/09613218.2023.2204417>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

CARLO, J.; LAMBERTS, R. Parâmetros e métodos adotados no regulamento de etiquetagem da eficiência energética de edifícios – parte 2: método de simulação. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, n. 2, p. 27-40, abr./jun. 2010b. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000200002>. Acesso em: 21 de março de 2025.

CARO-MARTÍNEZ, R.; SENDRA, J. Implementation of urban building energy modeling in historic districts. Seville as case-study. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 13, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2495/SDP-V13-N4-528-540>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

CARTA DE BURRA (1980). **Carta ICOMOS da Austrália para Locais de Importância Cultural**, 2013. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/226>. Acesso em 27 de janeiro de 2025.

CARTA DE VENEZA (1964). **Carta internacional sobre a conservação e o restauro de monumentos e sítios históricos**. Disponível em: <http://portal.iphan.gov.br/pagina/detalhes/226>. Acesso em 27 de janeiro de 2025.

CARVALHO, C. Conservação preventiva de edifícios e sítios históricos: pesquisa e prática. **Revista CPC**, Rio de Janeiro, n. 18, p. 141-153, 2014. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/cpc/article/view/88655>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

CARVALHO, G. *et al.* Bibliometrics and systematic reviews: A comparison between the Proknow-C and the Methodi Ordinatio, **Journal of Informetrics**, v.14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.joi.2020.101043>. Acesso em: 21 de abril de 2024.

CENTRO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (CB3E). **Nota técnica Nº 07/2014**. Nota técnica referente à etiquetagem de edificações comerciais, de serviços e públicas em blocos, 2014. Disponível em: https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/Nota_Tecnica_07_Edif_Blocos_2015_1029_0_0.pdf. Acesso em: 12 de novembro de 2024.

CERTI – FUNDAÇÃO CENTRO DE REFERÊNCIA EM TECNOLOGIAS INOVADORAS. **Relatório de Inspeção Edifícios Comerciais de Serviços Públicos**, n 3436/13. Data de emissão 24 de julho de 2013. (Disponibilizado por LABCON/UFMG).

CINQUEPALMI, F. *et al.* Efficiency and Sustainability: The Role of Digitization in Re-Inhabiting the Existing Building Stock. **Energies**, v. 16, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en16093613>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

CIT/DPP/PRA/UFMG. **Arquivo digital disponibilizado pelo Centro de Informações Técnicas/ Departamento de Planejamento e Projetos/ Pró Reitoria de Administração/ Universidade Federal de Minas Gerais**. 2024.

COELHO, A. **A utilização do BIM na análise da eficiência energética de edifícios: ferramentas e interoperabilidade**. (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis da Escola de engenharia da Universidade do Minho), Portugal, 2020. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/67090>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

CORRÊA, A. *et al.* O edifício sede e seus diálogos com as arquiteturas do movimento moderno nos contexto nacional e internacional. *In*: LEMOS, C. B.; DANGELO, A. G. D.; CARSALADE, F. L. (Org.). **Escola de Arquitetura da UFMG: lembranças do passado, visão do futuro**. Belo Horizonte: Escola de Arquitetura da UFMG, 2010. p. 150-187.

COSTA, A.; CUPERSCHMID, A.; NEVES, L. HBIM and BEM association: Systematic literature review. **Journal of Cultural Heritage**, v. 66, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2024.01.008>. Acesso em: 18 de maio de 2024.

COSTA, G.; SICILIA, A. Web technologies for sensor and energy data models. **Building and Semantics**. Data Models and Web Technologies for the Built Environment; Pauwels, P., McGlenn, K., Eds.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2022; pp. 51–68. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003204381-4/web-technologies-sensor-energy-data-models-gon%C3%A7al-costa-%C3%A1lvaro-sicilia>. Acesso em: 13 de agosto de 2024.

CURTO, D. *et al.* Energy Efficiency in Historic Architecture: The “Ex Institute of Zoology and Comparative Anatomy” in Palermo. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app13158882>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

DANTAS, A. **Análise da Eficiência Energética Preliminar de Edifícios com Auxílio de Metodologias BIM**. Dissertação (Mestrado em Projeto Integrado na Construção de Edifícios) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 72. 2022. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/144946/3/589670.1.pdf>. Acesso em: 23 de novembro de 2024.

DAUDÉN, J. **O que são e quais as diferenças entre retrofit, reabilitação e restauro?** 13 de abril de 2020. ArchDaily Brasil. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/937253/o-que-sao-e-quais-as-diferencas-entre-retrofit-reabilitacao-e-restauro>> ISSN 0719-8906. Acesso em 27 de janeiro de 2025.

DJUKIC, A.; CAIRES, B.; LINO, J. Definição e controlo dos requisitos de informação BIM. In: **5º Congresso Português de Building Information Modelling**. UMinho Editora, 2024, p. 449 – 460. Disponível em: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.164.37>. Acesso em: 20 de agosto de 2024.

DORE, C.; MURPHY, M. Integration of Historic Building Information Modeling (HBIM) and 3D GIS for recording and managing cultural heritage sites, 2012, **18th International Conference on Virtual Systems and Multimedia**, Milan, Italy, 2012, p. 369-376. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/VSM.2012.6365947>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

ENERGYPLUS site. **QuickStart**. Disponível em: <https://energyplus.net/quick-start>. Acesso em: 15 de março de 2025.

ENSSLIN, L. *et al.* Processo para evidenciação do estado da arte aplicado ao tema gestão de produção científica. **Transinformação**, v. 27, n. 3, 2015. Disponível em: <https://periodicos.puc-campinas.edu.br/transinfo/article/view/6083>. Acesso em: 21 maio. 2024.

ETXEPARE, L. *et al.* Advanced Intervention Protocol in the Energy Rehabilitation of Heritage Buildings: A Minones Barracks Case Study. **Sustainability**, v. 12, 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su12156270>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Energy, Heald, S., Debrosses, N., Rademaekers, K. *et al.* **Study on energy prices, costs and subsidies and their impact on industry and households** – Final report, Publications Office, 2018. Disponível em: <https://data.europa.eu/doi/10.2833/825966>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

EUROSTAT (Statistical Office of the European Union) (2013). **Database:** Income and living conditions: Living Conditions. Housing Conditions. Disponível em: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/income-and-living-conditions/database>. Acesso em: 30 de abril de 2024.

FROTA, A.; SCHIFFER, S. **Manual de Conforto Térmico**. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 5ª edição. Disponível em: <https://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/18350/material/ManualConfortoTERMICO.pdf>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

GARCIA, M. **Eficiência Energética em Edifícios:** Investigação do S3E como Interface de Simulação Simplificada. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável), Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/MMMD-AMWU5G>. Acesso em: 07 de novembro de 2024.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2015-0181>. Acesso em: 22 de janeiro de 2024.

GHIRARDELLO, N., SPISSO, B. (org). **Patrimônio histórico:** como e por que preservar. Colaboradores: Gerson F. et al. – Bauru, SP: Canal 6, 2008. Disponível em: https://www.creasp.org.br/arquivos/publicacoes/patrimonio_historico.pdf. Acesso em 27 de janeiro de 2025.

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 da Universidade de Brasília), Brasília, 2017. Disponível em: <http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/25204>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

GREMELSPACHER, J.; PIZARRO, R.; JAARVELD, M.; DAVIDSSON, H.; JOHANSSON, D. Historical building renovation and PV optimisation towards NetZEB in Sweden, **Solar Energy**, v. 223, p. 248-260, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.067>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

GUIMARÃES, M. **Uma análise para retrofit da envoltória tombada visando a eficiência energética do Aeroporto Santos Dumont – Rio de Janeiro**. 2017. 143 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2017. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/24479>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

HUSSAIN, M.; ERZAIJ KADHIM, R. Employ 6D-BIM Model Features for Buildings Sustainability Assessment. **International Conference on Geotechnical Engineering-Iraq**. v. 901. Baghdad, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/901/1/012021>. Acesso em: 31 janeiro de 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 19650-1**: Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using BIM – Part 1: Concepts and principles. ISO, 2018.

ISAYEVA, A. **Aplicação do BIM à avaliação e gestão da eficiência energética de edifícios públicos**. 2018. 187 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2018. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/25381/1/Documento.pdf>. Acesso em: 18 de agosto de 2023.

ISOLANI, P. **Eficiência energética nos edifícios residenciais**. Lisboa: Ener Building.eu, 2008. Disponível em: http://www.powerhouseeurope.eu/uploads/tx_phecasestudies/R_Enerbuilding_1_1__PT_.pdf. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

JAPIASSÚ, P. **Método para avaliação de retrofit energético em edificações históricas brasileiras**. 2019. 321f. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/38668>. Acesso em: 14 de agosto de 2023.

JIANG, W. *et al.* Protective energy-saving retrofits of rammed earth heritage buildings using multi-objective optimization. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 38, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102343>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

KAMEL, E.; MEMARI, A. Review of BIM's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions, **Automation in Construction**, v. 97, p.164-180, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.008>. Acesso em: 14 de agosto de 2023.

KHALIL, A.; HAMMOUDA, N.; EL-DEEB, K. Implementing sustainability in retrofitting heritage buildings. Case study: Villa antoniadis, alexandria, egypt. **Heritage**, v. 1, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/heritage1010006>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

KHUDHAIR, A.; *et al.* Towards Future BIM Technology Innovations: A Bibli-ometric Analysis of the Literature. **Applied Sciences**, v.11, 1232, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11031232>. Acesso em: 30 de janeiro de 2025.

LANGNER, M.; SACHT, H.; VETTORAZZI, E. Análise do uso de ferramentas de design generativo para criação de elementos de controle solar para a arquitetura. In: XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, v.18, n. 1, 2020. **Anais [...]**. Porto Alegre: ANTAC, 2020. p. 1-8. Disponível em: <https://doi.org/10.46421/entac.v18i.877>. Acesso em: 14 março de 2025.

LOPES, D. **Patrimônio Universitário da UFMG: Construção de um panorama de seus imóveis protegidos**. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável), Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/41161/1/DISSERTACAO_DANIELE%20R%20SERRA%20LOPES.pdf. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

LUCCHI E.; AGLIATA, R. HBIM-based workflow for the integration of advanced photovoltaic systems in historical buildings. **Journal of Cultural Heritage**, v. 64, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2023.10.015>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

MASSAFRA, A. *et al.* Building Information Modeling and Building Performance Simulation-Based Decision Support Systems for Improved Built Heritage Operation. **Sustainability**, v. 15, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/su151411240>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

MELO, A. **Desenvolvimento de um método para estimar o consumo de energia de edificações comerciais através da aplicação de redes neurais**. 189 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina), Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/99427>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

MEONI, A. *et al.* Integration of structural performance and human-centric comfort monitoring in historical building information modeling. **Automation in Construction**, v. 138, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104220>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

MILONE, D.; PERI, G.; PITRUZZELLA, S.; RIZZO, G. Are the Best Available Technologies the only viable for energy interventions in historical buildings?, **Energy and Buildings**, v. 95, p. 39-46, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.004>. Acesso em: 13 de agosto de 2023.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Eficiência Energética: guia para etiquetagem de edifícios: Volume 2**. Brasília: MMA, 2015. 70 p. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/editais-e-chamadas-p%C3%BAblicas/item/10546-guiasevideos.html>. Acesso em: 26 de novembro de 2024.

MOURA, N.; COSTA, A. HBIM e Interoperabilidade: Uma abordagem sistemática baseada em aplicações práticas. In.: **ptBIM 2020 – 3º Congresso Português de Building Information Modelling**, 2020, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: https://books.fe.up.pt/index.php/feup/catalog/download/978-972-752-272-9/978-972-752-272-9_0621-0632/188?inline=1. Acesso em: 16 de agosto de 2023.

MUTA, L. **Análise da aplicação de BIM na avaliação simplificada de eficiência energética da envoltória pela INI-C**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal de Pelotas), Pelotas, 2022. Disponível em: <https://guaiaca.ufpel.edu.br/handle/prefix/14360>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

NAGY, G.; ASHRAF, F. HBIM platform & smart sensing as a tool for monitoring and visualizing energy performance of heritage buildings. **Developments in the Built Environment**, v. 8, 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100056>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

OPENSTUDIO site. **Modeling Best Practices**. Disponível em: https://nrel.github.io/OpenStudio-user-documentation/help/best_practices/. Acesso em: 15 de março de 2025.

PANAGIOTIDOU, V.; KORNER, A. From Intricate to Coarse and Back: A voxel-based workflow to approximate high-res geometries for digital environmental simulations. In **Proceedings of the 40th eCAADe Conference**, Gante, Belgica, 2022, v.1, p. 491–500. Disponível em: <https://doi.org/10.52842/conf.ecaade.2022.1.491>. Acesso em: 13 de agosto de 2024.

PANTELI, C.; KYLILI, A.; FOKAIDES, P. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond – A critical review, **Journal of Cleaner Production**, v. 265, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766>. Acesso em: 30 de janeiro de 2025.

PEREIRA, V.; SANTOS, J.; LEITE, F.; ESCÓRCIO, P. Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review, **Energy and Buildings**, v. 250, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292>. Acesso em: 16 de agosto de 2023.

PISELLI, C. *et al.* An Integrated HBIM Simulation Approach for Energy Retrofit of Historical Buildings Implemented in a Case Study of a Medieval Fortress in Italy. **Energies**, v.13, 2020a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en13102601>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

PISELLI, C. *et al.* Facility Energy Management Application of HBIM for Historical Low-Carbon Communities: Design, Modelling and Operation Control of Geothermal Energy Retrofit in a Real Italian Case Study. **Energies**, v. 13, 2020b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en13236338>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

POCHWALA, S. *et al.* Energy source impact on the economic and environmental effects of retrofitting a heritage building with a heat pump system. **Energy**, v. 278, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2023.128037>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

PRIZEMAN, O. HBIM and matching techniques: considerations for late nineteenth- and early twentieth-century buildings. **Journal of Architectural Conservation**, v. 21, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/13556207.2016.1139852>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

RENOU-MAISANT, P.; ABDESSELAM, R.; BONNET, J. Trajectories for Energy Transition in EU-28 Countries over the Period 2000-2019: a Multidimensional Approach. **Environmental Modeling & Assessment**. v. 27. p.525-551. Springer Nature. Cham, Suíça. 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-022-09816-7>. Acesso em: 29 de janeiro de 2025.

ROBERTI, F. *et al.* Energy retrofit and conservation of a historic building using multi-objective optimization and an analytic hierarchy process. **Energy and Buildings**, v. 138, p. 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.028>. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

_____. Energy retrofit and conservation of built heritage using multi-objective optimization: demonstration on a medieval building. In: Building Simulation Application – BSA, 2015, Italy. **Proceedings...** Bolzano: IBPSA-Italy, 2015. p.189-197. Disponível em: https://publications.ibpsa.org/conference/paper/?id=bsa2015_9788860460745_24. Acesso em: 21 de agosto de 2023.

RUSCHEL, R. To BIM or not to BIM. **Encontro da Associação Nacional de Pesquisa E Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo**, v. 3, p. 1-12, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Regina-Ruschel/publication/282669890_To_BIM_or_not_to_BIM/links/5617c8fb08ae4780f241e131/To-BIM-or-not-to-BIM.pdf. Acesso em: 23 de novembro de 2024.

SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. **Manual de BIM: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores**. Porto Alegre: Bookman, 2021. 3ª edição.

SILVEIRA, D.; CÓRDOVA, F. A pesquisa científica. In: GERHARDT, T. (Org.); Silveira, D. (Org.). **Métodos de Pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. v. 1. 118p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/52806>. Acesso em: 13 de maio de 2024.

SIRTULI, B. P.; DIAS, R. H. M. de P.; RODRIGUES, E. A. N. Eficiência energética da envoltória de edifícios históricos: métodos RTQ-C e INI-C. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 13, 2022. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v13i00.8660644>. Acesso em: 25 de fevereiro de 2025.

SITE ARQ-UFMG. (s.d.). Disponível em: <https://www.arq.ufmg.br/ea/escola/>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

SITE BOLETIM UFMG. (2008). Disponível em: <https://www.ufmg.br/boletim/bol1620/10.shtml>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

SITE VITRUVIUS. (2005). Disponível em: <https://vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/06.066/408>. Acesso em: 08 de outubro de 2024.

SPBIM. **Parede composta vs parede cebola.** Disponível em: <https://spbim.com.br/paredecomposta-vs-paredecebola/#:~:text=M%C3%A9todo%20cebola,para%20pisos%20e%20seus%20revestimentos>. Acesso em: 12 mar. 2025.

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

TOFANI, F. **Fundamentos conceituais da conservação de bens culturais.** 2023. Disponível em: <https://www.patrimonios.org/ensino-pesquisa-extensao/pos-graduacao/fcc/material-didatico>. Acesso em: 27 de janeiro de 2025.

TOLENTINO, M. **A utilização do HBIM na documentação, na gestão e na preservação do Patrimônio Arquitetônico.** Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura da Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 330. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/27947>. Acesso em: 16 de agosto de 2023.

UFMG. **Prédio da Escola de Arquitetura é tombado.** Belo Horizonte, jun. 2009. Disponível em: <https://www.ufmg.br/online/arquivos/012259.shtml>. Acesso em: 1 de março de 2021.

UNFCCC. PARIS AGREEMENT. **Paris Agreement on Climate Change.** Paris, December 12, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/37107>. Acesso em: 26 de abril de 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2023). **Emissions Gap Report 2023: Broken Record – Temperatures hit new highs, yet world fails to cut emissions (again).** Nairobi, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/43922>. Acesso em: 26 de abril de 2024.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2024). **Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector.** Nairobi. Disponível em: <https://doi.org/10.59117/20.500.11822/45095>. Acesso em: 29 de abril de 2024.

VAZ, C. *et al.* Avaliação de desempenho na gestão estratégica organizacional: seleção de um referencial teórico de pesquisa e análise bibliométrica. **Revista Gestão Industrial**, v. 8, n. 4, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3895/S1808-04482012000400008>. Acesso em: 21 de maio de 2024.

WANG, H. *et al.* How occupant positioning systems can be applied to help historic residences manage energy consumption: A case study in China. **Building and Environment**, v. 249, 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111110>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Bringing Embodied Carbon Upfront**, 2019. Disponível em: <https://worldgbc.org/advancing-net-zero/embodied-carbon/>. Acesso em: 26 de abril de 2024.

YOUNIS, A.; TAWALBEH, M. Innovative Energy Retrofit Approach of Historical Buildings Using HBIM Process: The Guest House of Al-Karak Greater Municipality in Jordan a Case Study. **Civil Engineering and Architecture**, v. 12, 2024. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85184727576&doi=10.13189%2fcea.2024.120239&partnerID=40&md5=4ad5dffbb747432dd0f74b9b9b6fd98c>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

YOUTUBE - ENG. LUIS FERNANDO. **Paredes no Revit** (orçamento, planejamento, anteprojeto, executivo) - básica, composta e "cebola". 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=SxGLYJlhTP0>. Acesso em: 12 março de 2025.

ZHANG, J. *et al.* Multi-indicator adaptive HVAC control system for low-energy indoor air quality management of heritage building preservation. **Building and Environment**, v. 246, 2023. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110910>. Acesso em: 03 de junho de 2024.

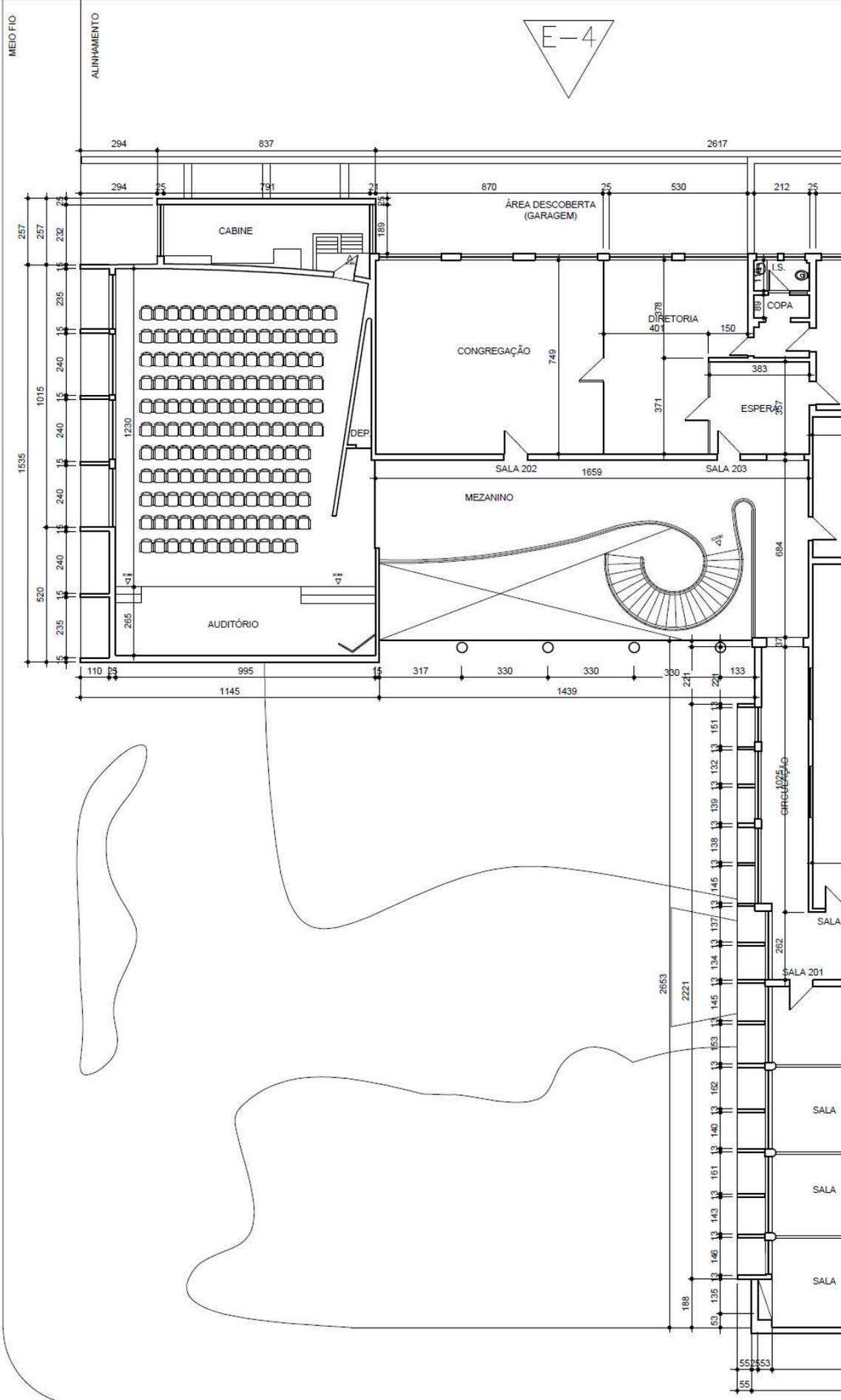
APÊNDICE A – Quadro resumo de softwares utilizados pelos autores

AUTORES	SOFTWARES UTILIZADOS NOS ESTUDOS DE CASO							
	Nuvem de pontos	HBIM	AVAC	MEP	Iluminação	Simulação energética	Simulação térmica	Mapeame
Piselli <i>et al.</i> (2020a)	X	Revit	DesignBuilder	X	X	EnergyPlus	X	X
Prizeman (2015)	X	Revit	X	X	Radiance	X	X	X
Piselli <i>et al.</i> (2020b)	X	Revit	DesignBuilder	Revit	X	EnergyPlus	X	X
Khalil, Hammouda e El-deeb (2018)	X	DesignBuilder	DesignBuilder	DesignBuilder	X	EnergyPlus	X	X
Caro-Martínez e Sendra (2018)	X	DesignBuilder	X	X	X	X	DesignBuilder	ArcMap
Nagy e Ashraf (2021)	X	X	X	X	X	X	X	X
Meoni <i>et al.</i> (2022)	X	Revit	X	X	X	X	X	X
Etxepare <i>et al.</i> (2020)	PointSense	Revit	X	X	X	DesignBuilder EnergyPlus	Therm	X
Calcerano <i>et al.</i> (2024)	X	Archicad Revit	X	X	X	Termolog Cypetherm HePlus EnergyPlus DesignBuilder	Termolog	X
Jiang <i>et al.</i> (2022)	X	Revit	X	X	X	OpenStudio EnergyPlus	X	X
Pochwala <i>et al.</i> (2023)	X	Arcadia Architektura	X	X	X	Arcadia Thermocad	X	X
Cinquepalmi <i>et al.</i> (2023)	X	Revit	X	X	X	Green Building Studio	X	ArcGIS
Lucchi e Agliata (2023)	X	Edificius Sketchup	X	X	X	X	X	X
Massafra <i>et al.</i> (2023)	X	Revit	X	X	X	Energy Plus	X	X
Zhang <i>et al.</i> (2023)	X	Revit	X	X	X	OpenStudio	X	X
Abdullah e Hatem (2023a)	X	Revit	X	X	X	Green Building Studio Insight 360	X	X
Wang <i>et al.</i> (2024)	Geomagic studio Realworks	Realworks Sketchup Revit	X	X	X	X	X	X
Abdullah e Hatem (2023b)	X	Revit	X	X	X	Green Building Studio Insight 360	X	X

		Arcadia Architektura=1				OpenStudio=2		
		Edificius=1				Termolog=1		
		Realwork=1				Cypetherm HePlus=1		
		Termus=1				Arcadia Thermocad=1		
						BIM Termus=1		

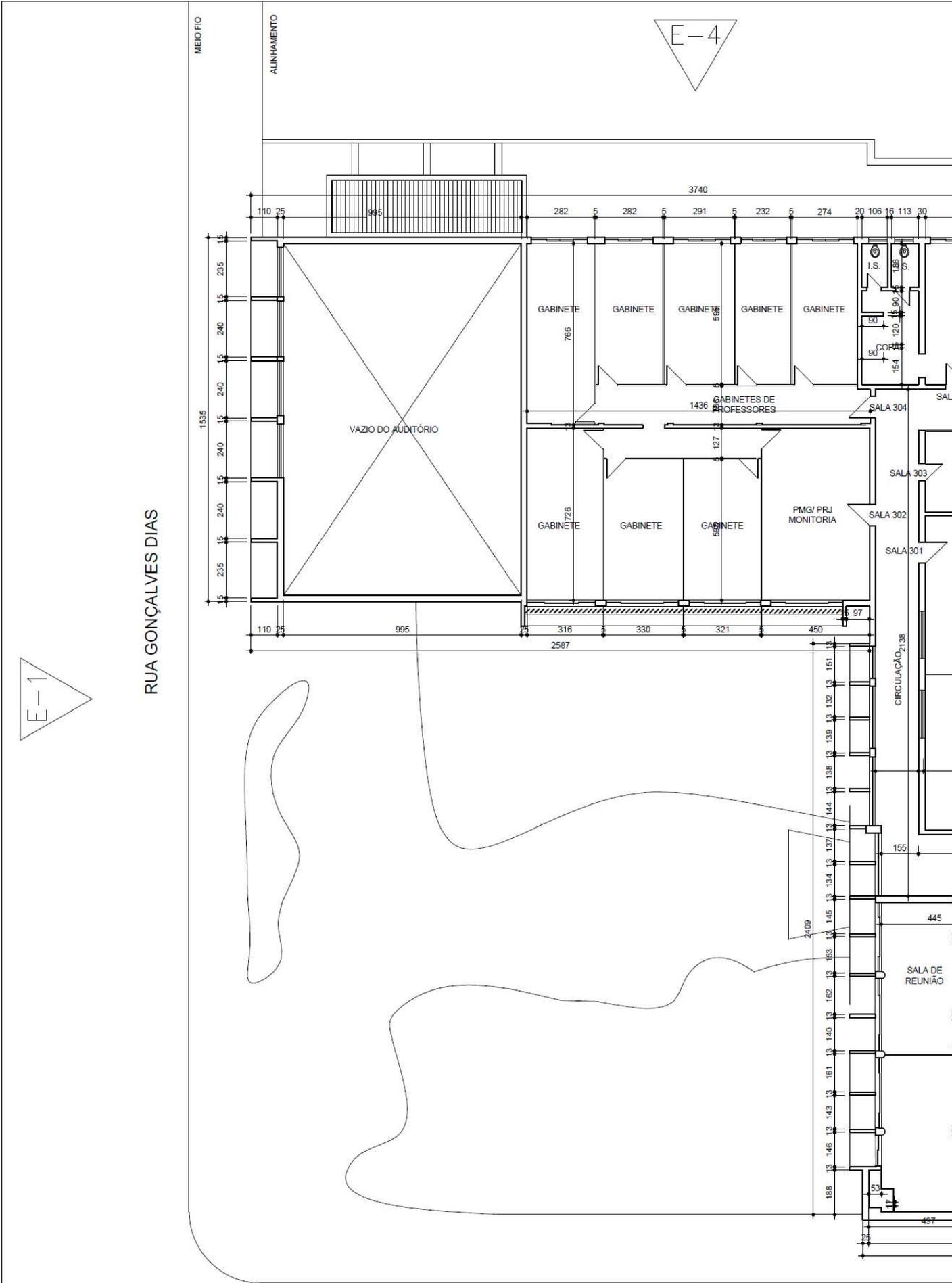
E-1

RUA GONÇALVES DIAS



PLANTA 2º PAVIMENTO

RUA PARAÍBA



RUA GONÇALVES DIAS

RUA PARAIBA

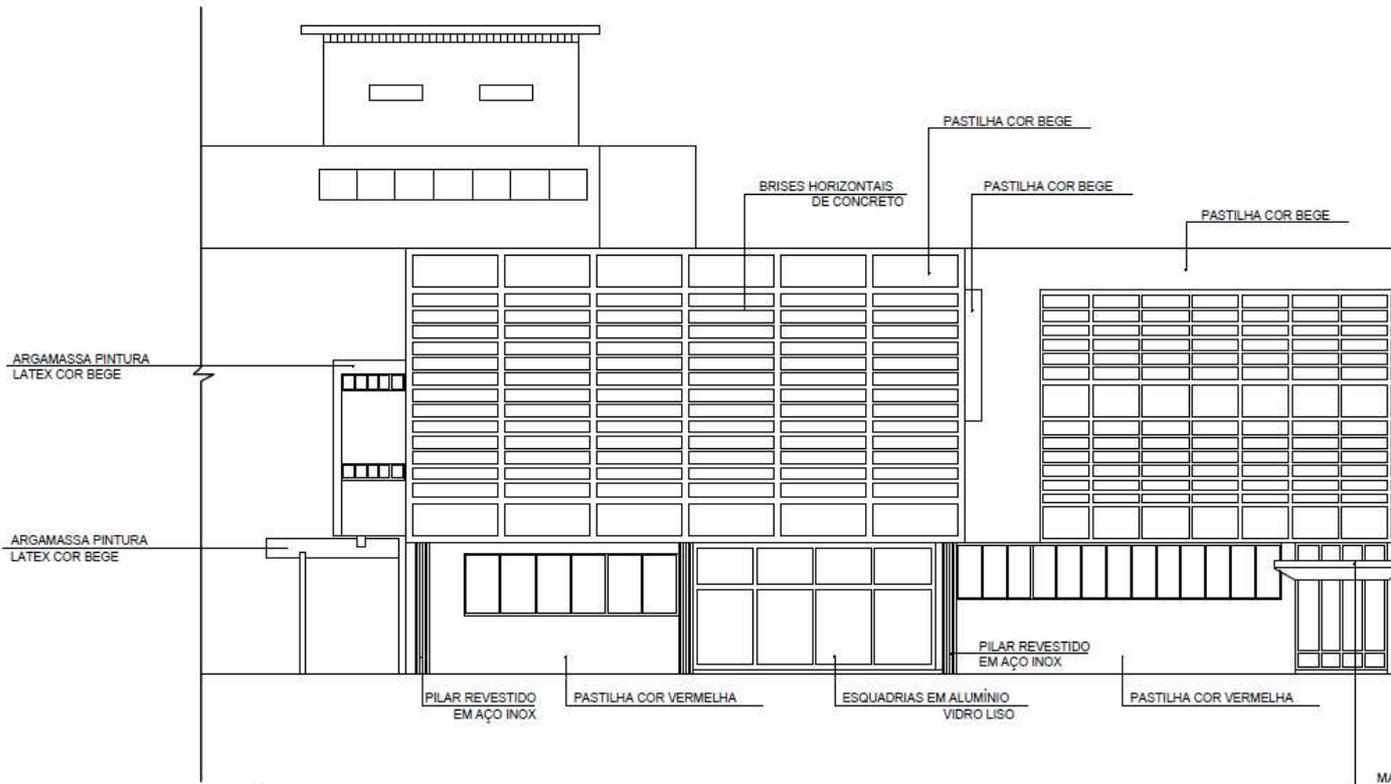
PLANTA 3° PAVIMENTO



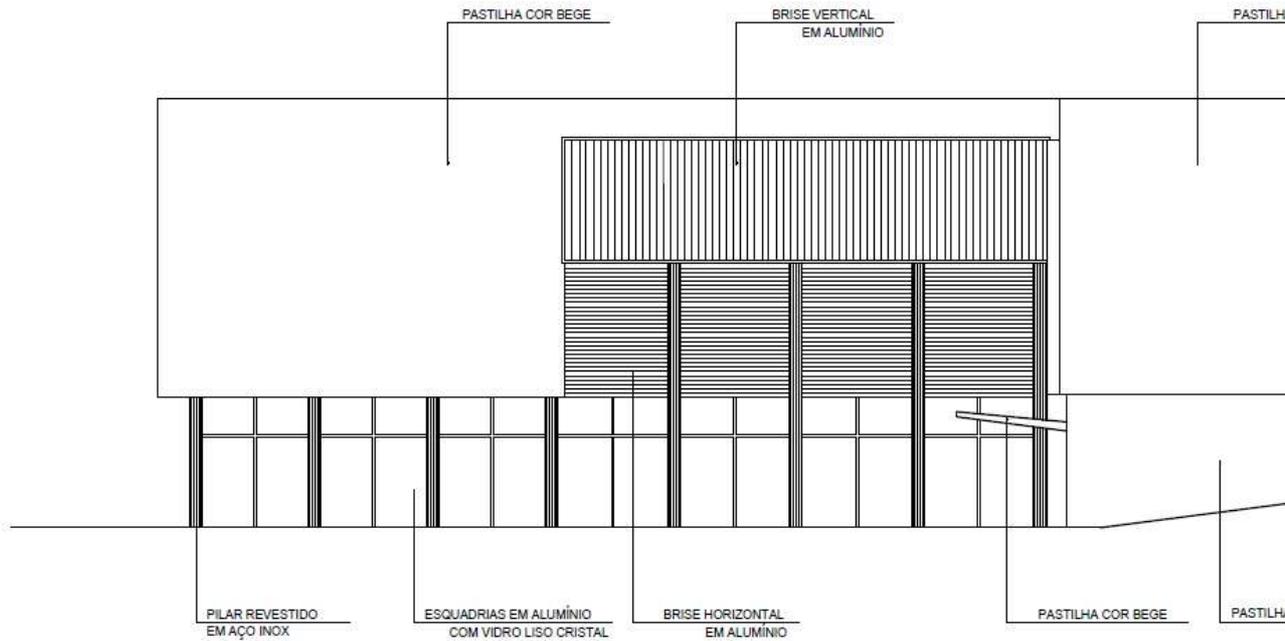
RUA GONÇALVES DIAS

RUA PARAIBA

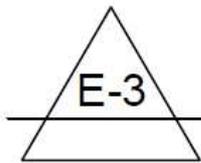
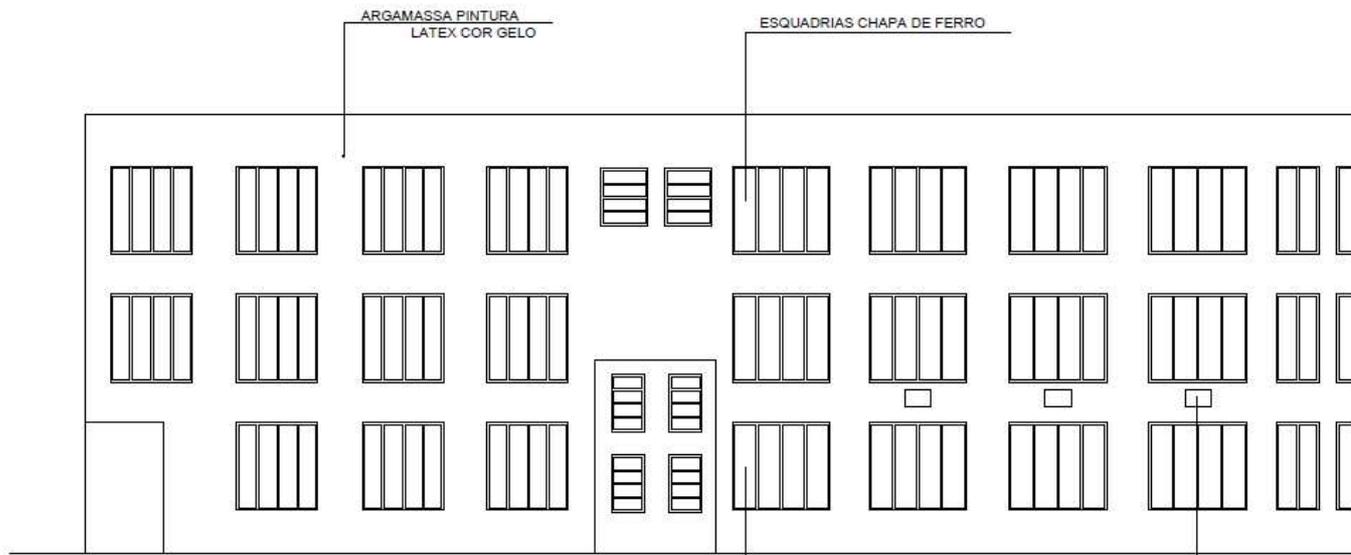
PLANTA DE COBERTURA



E-1 ELEVÇÃO 1 SEM ESCALA



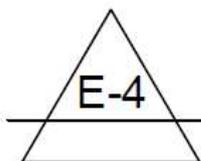
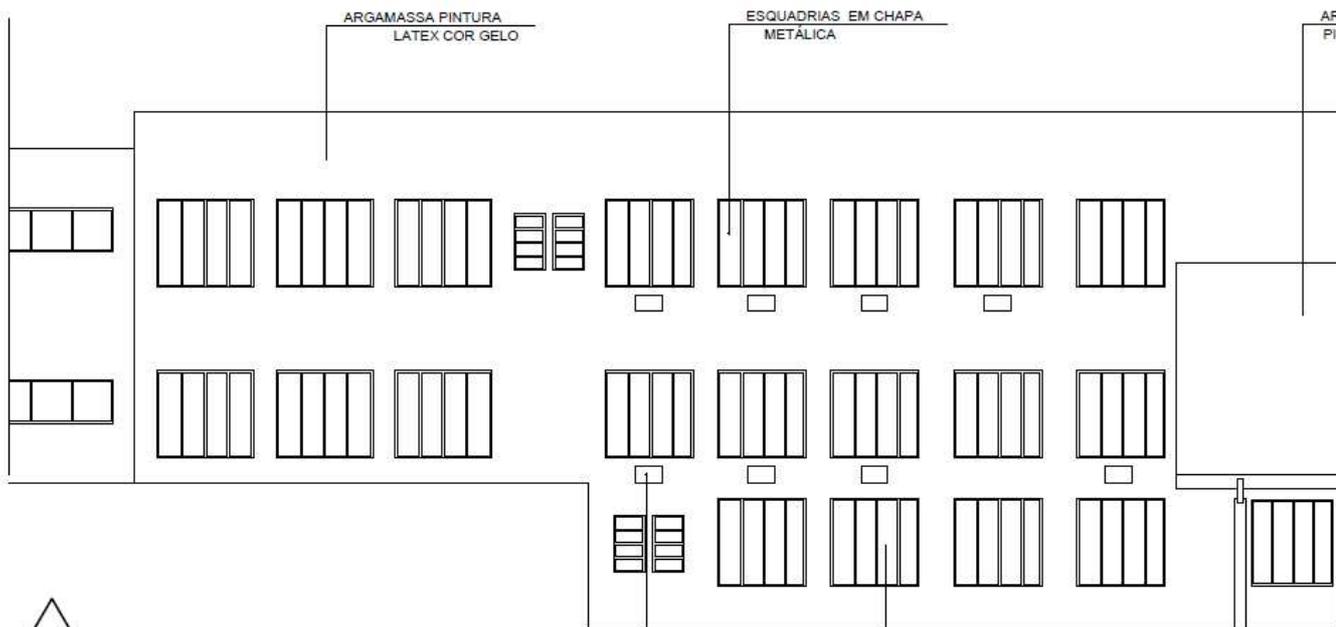
E-2 ELEVÇÃO 2 SEM ESCALA



ELEVAÇÃO 3
SEM ESCALA

ESQUADRIAS CHAPA DE FERRO
COM GRADE METÁLICA

AR CONDICIONADO



ELEVAÇÃO 4
SEM ESCALA

AR CONDICIONADO

ESQUADRIAS EM CHAPA
METÁLICA COM GRADE

AR
PI