



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Luís Filipe Vareto

Uso do BIM para análise econômica de alternativas para melhoria do desempenho térmico de edificações

Ouro Preto

2023

Uso do BIM para análise econômica de alternativas para melhoria do desempenho
térmico de edificações

Luís Filipe Vareto

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 31/03/2023

Área de concentração: Desempenho de edificações

Orientadora: Dra. Júlia Castro Mendes – UFOP

Orientador: Eng. Vítor Freitas Mendes – UFOP

Ouro Preto

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

V296u Vareto, Luis Filipe.

Uso do BIM para análise econômica de alternativas para melhoria do desempenho térmico de edificações. [manuscrito] / Luis Filipe Vareto. - 2023.

89 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadores: Profa. Dra. Júlia Castro Mendes, Me. Vítor Freitas Mendes.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Análise térmica. 2. Orçamento - Análise. 3. Isolamento térmico. 4. Building Information Modeling (BIM). I. Mendes, Júlia Castro. II. Mendes, Vítor Freitas. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luís Filipe Vareto

Uso do BIM para análise econômica de alternativas para melhoria do desempenho térmico de edificações

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil

Aprovada em 31 de março de 2023

Membros da banca

Profa. D.Sc. Júlia Castro Mendes - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Vítor Freitas Mendes - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Dr. Mauricio Leonardo Aguilar Molina - (Universidade Federal de Juiz de Fora)
Eng. M.Sc. Júlia Assumpção de Castro - (Universidade Federal de Juiz de Fora)

Júlia Castro Mendes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Julia Castro Mendes, Usuário Externo**, em 20/04/2023, às 12:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0513002** e o código CRC **681AA5E5**.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Alessandra e Giovani que sempre estiveram ao meu lado me apoiando durante minha trajetória.

A Bianca por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos professores do Curso de Engenharia Civil por toda dedicação e ensinamentos.

Aos meus orientadores Julia e Vitor por toda dedicação.

Aos meus amigos que fizeram parte desta jornada e estiveram comigo em diversos momentos.

RESUMO

O desempenho térmico de uma edificação está diretamente ligado ao conforto térmico dos seus usuários e ao consumo de energia para condicionamento do ambiente interno. Diversas alternativas podem ser exploradas para melhoria do desempenho térmico de uma edificação, como a seleção de materiais isolantes térmicos para as envoltórias. Além do desempenho, no âmbito da construção civil, deve-se considerar o custo do empreendimento e assim garantir sua viabilidade financeira. Nesse sentido, a utilização de softwares que tem como base a metodologia BIM nos permite criar modelos detalhados e atribuir custos e propriedades aos mesmos, tornando possível avaliar diversas possibilidades. Assim, o presente trabalho buscou identificar melhores alternativas realizando a análise térmica e orçamentária de três edificações, sendo duas de interesse social e uma de alto padrão. Para as análises foram variados 4 tipos de pisos, 4 de paredes e 4 de coberturas. As análises foram feitas utilizando o software Autodesk Revit, no qual as edificações foram modeladas e tiveram as propriedades térmicas dos materiais constituintes atribuídas. Os custos para execução também foram devidamente indicados no software, sendo retirados das tabelas SINAPI E SBC. Os resultados mostraram as combinações com melhores e piores resultados nas análises térmicas e financeiras. Foi possível, também, definir o sistema construtivo com melhor custo-benefício, com um bom desempenho térmico e baixo custo de execução, com base nos parâmetros ambientais analisados. Verificou-se que a envoltória vertical, dentre as analisadas, foi a que obteve maior peso sobre análises térmicas e financeiras. Conclui-se então a importância de análise térmica junto a orçamentária durante a etapa inicial de projeto, de modo a auxiliar a tomada de decisões e garantir assim um máximo desempenho aos usuários com custo mais baixo possível.

Palavras-chaves: Análise térmica, Análise orçamentária, BIM, Desempenho térmico.

ABSTRACT

The thermal performance of a building is directly linked to the thermal comfort of its users and to the energy consumption for conditioning the internal environment. Several alternatives can be explored to improve the thermal performance of a building, such as the selection of thermal insulating materials for the envelope. In addition to performance, in the realm of civil construction, the cost of the project must be considered to ensure its financial viability. In this sense, the use of software based on BIM methodology allows us to create detailed models and assign costs and properties to them, making it possible to evaluate various possibilities. Thus, the present work sought to identify the best alternatives by performing a thermal and budgetary analysis of three buildings, two of them of social interest and one of them of high standard. For the analysis, four types of floors, four types of walls and four types of roofs were used. The analyses were done using Autodesk Revit software, in which the buildings were modelled and the thermal properties of the constituent materials were assigned. The costs for execution were also duly indicated in the software, being taken from the SINAPI and SBC tables. The results showed the combinations with the best and worst results in the thermal and financial analyses. It was also possible to define the most cost-effective building system, with a good thermal performance and low execution cost, based on the environmental parameters analysed. It was verified that the vertical envelope, among those analysed, was the one with the highest weight in the thermal and financial analyses. It is concluded then the importance of thermal analysis along with budget analysis during the initial stage of the project, in order to assist decision making and thus ensure maximum performance to users with the lowest possible cost.

Keywords: Thermal Analysis, Budget Analysis, BIM, Thermal Performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma. Fonte: autor.....	24
Figura 2: Modelo 3D e Planta da habitação de interesse social adaptada da Vila Sustentável (HIS 1). Fonte: (FRANCO, MENDES, <i>et al.</i> , 2019) adaptado pelo autor.	24
Figura 3: Modelo 3D e Planta da Edificação de interesse social adaptada da Engeplena (HIS 2). Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.....	25
Figura 4: Modelo 3D edificação de alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.	25
Figura 5: Planta edificação alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.	26
Figura 6: Esquema solar e orientação das edificações. Fonte: autor.	28
Figura 7: Esquema dos modelos de paredes utilizadas. Fonte: Autor.	31
Figura 8: Esquema dos modelos de coberturas utilizadas. Fonte: Autor.	32
Figura 9: Esquema dos modelos de pisos utilizados. Fonte: Autor.....	32
Figura 10: Modelos analíticos de energia. Esquerda: HIS adaptada da Casa Sustentável. Meio: HIS adaptada da Engeplena. Direita: habitação de alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: autor.	35
Figura 11: Esquemas do anteprojeto estrutural. Esquerda: HIS 1. Meio: HIS 2. Direita: Alto Padrão. Fonte: autor.	36
Figura 12: Composição SINAPI – 103332. Fonte: Orçafascio (ORÇAFASCIO, 2023).	37
Figura 13: Exemplo de tabela orçamentária disponibilizada pelo Revit para a HIS 2. Fonte: autor.	40
Figura 14: Demanda energética da edificação propiciada pelas combinações dos sistemas construtivos, de acordo com as variações de cada um desses sistemas (seus custos são identificados por cor). Fonte: autor.....	44

Figura 15: Comparação do custo dos sistemas de parede e do sistema estrutural. Fonte: Autor.....	46
Figura 16: Demanda energética de aquecimento e resfriamento para cada combinação das três edificações. As colunas hachuradas mostram o pior e melhor casos. Fonte: Autor.	51
Figura 17: Análise orçamentária das três edificações levando em conta necessidade do elemento estrutural (em milhares de reais). As colunas hachuradas mostram o pior e melhor casos. Fonte: Autor.....	57
Figura 18: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para HIS 1. Fonte: autor.....	59
Figura 19: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para HIS 2. Fonte: autor.....	60
Figura 20: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para residência de alto padrão. Fonte: autor.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de paredes.	29
Tabela 2: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de coberturas.	30
Tabela 3: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de piso.....	31
Tabela 4: Esquadrias especificadas nos modelos.	33
Tabela 5: Composições utilizadas para análise de custo. Fonte: autor.	38
Tabela 6: Quantitativos das envoltórias para cada edificação. Fonte: autor.	39
Tabela 7: Resumo das combinações com melhor e pior desempenho.....	51
Tabela 8: Resumo das combinações com maior e menor custo.....	57
Tabela 9: Esquema das combinações realçadas na Figura 20	61

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Motivação	1
1.2	Objetivo geral.....	4
1.3	Objetivos específicos.....	4
2	Revisão Bibliográfica.....	5
2.1	Desempenho térmico.....	5
2.1.1	Contexto histórico no Brasil e no mundo.....	6
2.1.2	Alternativas para melhoria do desempenho térmico de uma edificação 9	
2.2	BIM – <i>Building Information Modeling</i>	12
2.2.1	Definições, vantagens e desafios.....	12
2.2.2	BIM no Brasil.....	16
2.2.3	Dimensões do BIM.....	17
2.2.4	BIM para seleção de alternativas e orçamentação	20
3	Metodologia.....	23
3.1	Panorama Geral	23
3.2	Projetos arquitetônicos	24
3.3	Composição das envoltórias.....	28
3.4	Análise de desempenho térmico.....	33
3.5	Análise de custo	36
3.6	Tratamento dos resultados e Comparativo das Análises.....	40
4	Resultados	42
4.1	Comportamento geral dos sistemas construtivos	42

4.2	Análises de demanda energética que as combinações propiciam às edificações	49
4.3	Análise orçamentária da implementação dos sistemas construtivos na edificação.....	55
4.4	Pior e melhor combinação construtiva a partir de uma análise conjunta de melhorias energética e orçamentaria.....	58
5	Conclusão	65
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	68
	Referências.....	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os projetos arquitetônicos tendem a ser únicos, pois devem levar em consideração diversos fatores como o gosto dos usuários, a região, a utilização da edificação, topografia do terreno, localização, os sistemas construtivos e materiais utilizados, entre outros. Muitos desses fatores estão diretamente relacionados ao desempenho térmico da edificação, sendo importante que o projeto arquitetônico inclua análises desse tipo (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

O desempenho térmico de uma edificação se refere ao fenômeno do processamento de energia da edificação equacionando entre os ambientes internos e os seus arredores (JOSEPH, JOSE e HABEEB, 2015). Em outras palavras, o desempenho térmico de uma edificação consiste na sua capacidade de reagir ao clima externo. Dentre os fatores que influenciam no desempenho térmico, a envoltória é um dos principais (MOHAMMAD e SHEA, 2013). O desempenho térmico está diretamente relacionado com o conforto térmico e a eficiência energética da edificação.

O conceito de conforto térmico se refere ao estado mental, ou seja, à satisfação do homem com o ambiente circundante, sendo essa uma avaliação subjetiva (ASHRAE, 2017). Sabe-se que o ambiente influencia diversos aspectos no ser humano, sejam eles físicos, fisiológicos ou psicológicos. Da mesma forma, são inúmeras as variáveis que influenciam o conforto térmico de um indivíduo, divididas em ambientais e humanas (LAMBERTS, GHISI e PAPST, 2000). Como Lamberts et al. (2006) definem, as principais variáveis ambientais do conforto térmico são temperatura, umidade, velocidade do ar e radiação solar incidente; já as variáveis humanas estão relacionadas ao funcionamento do organismo e às vestimentas do ocupante da edificação.

A eficiência energética, por sua vez, representa a capacidade de uma edificação proporcionar conforto aos usuários sendo necessário um baixo consumo de energia, característica essa singular, para cada edificação (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Uma edificação com eficiência energética possui, entre outros fatores, um bom desempenho térmico, de modo a proporcionar conforto térmico aos que a utilizam com

o mínimo uso possível de equipamentos elétricos. Edificações que não possuem um desempenho térmico adequado podem afetar o bem-estar, a saúde e o conforto dos usuários, que acabam buscando, como remediação, sistemas elétricos de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar. Essas ações resultam num aumento considerável do consumo de energia, reduzindo a eficiência energética (PIEADADE, RODRIGUES e RORIZ, 2003).

Diversas alternativas podem ser utilizadas para melhoria do desempenho térmico de uma edificação, como alteração de esquadrias, adição de elementos de sombreamento, seleção de cobertura adequada, adoção de estratégias de ventilação mais eficazes, seleção de materiais com propriedades termofísicas avançadas ou alterações nas dimensões dos ambientes (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Como exemplos, Inéia et al. (2020) observaram significativas melhorias no desempenho térmico da edificação estudada e na sua economia a longo prazo a partir da substituição do reboco das paredes pelo gesso acartonado e adicionando uma camada isolante de poliestireno e lã de vidro ao forro. Lins et al. (2012) analisaram diversas intervenções para melhoria do desempenho térmico de uma determinada edificação. Dentre as inúmeras propostas adotadas pelos autores, as mais viáveis foram a implementação de uma fachada ventilada nas envoltórias verticais, a aplicação de reboco com vermiculita na face externa, adoção de gesso acartonado com isolamento de lã de rocha nas faces internas, alteração do tipo das esquadrias bem como espessura do vidro e a utilização de um telhado ventilado. A grande maioria dos trabalhos desenvolvidos nessa área avalia diferentes tipos de vedações fixando todo restante do sistema construtivo como padrão, ou avaliam diferentes tipos de vedação isoladamente e levam em conta somente melhoria do desempenho térmico e a economia que esse irá proporcionar sem considerar custos de cada sistema construtivo.

Como exemplo de uma análise combinada dessas características, Iskandar et al. (2019) avaliaram 12 sistemas construtivos, sendo eles resultados das combinações de 4 tipos paredes (alvenaria de tijolo furado 9cm com reboco, alvenaria de tijolo furado 14cm com reboco, paredes de concreto sem reboco e alvenaria de tijolo solo cimento sem reboco) e 3 tipos de cobertura (telha cerâmica sem forro, telha cerâmica

com forro de PVC e telha cerâmica com forro de gesso). Dentre todos os sistemas analisados, o sistema construtivo que possuía paredes de concreto foi o mais barato, porém foi o sistema que apresentou pior desempenho térmico independente do sistema de vedação horizontal. Já os sistemas de alvenaria apresentaram melhores resultados de desempenho térmico, porém com os custos mais elevados, sendo o sistema de alvenaria sem forro o que alcançou melhor resultado. Ressalta-se a importância de analisarmos o máximo de elementos de uma edificação simultaneamente, já que um tipo de sistema isolado pode ter um comportamento diferente de quando analisarmos considerando todo um conjunto.

Uma ferramenta eficaz para análise simultânea de múltiplos sistemas construtivos é a metodologia BIM (*Building Information Modeling*), em português Modelagem de Informação da Construção. Essa metodologia envolve tecnologias e processos que são utilizados para integração dos projetos a um único modelo parametrizado multidisciplinar. O resultado da utilização do BIM é um modelo único da edificação que permite obter relatórios, checagem de inconsistências, quantitativos de materiais, planilhas orçamentárias e diversos tipos de análises, incluindo a de desempenho térmico (EASTMAN, TEICHOLZ, *et al.*, 2008). Diante disso, observamos a possibilidade de usufruir das vantagens da metodologia BIM na análise de edificações, atentando-nos a um bom desempenho térmico e ao custo relacionado a esse desempenho. Buscamos, assim, atender às necessidades conscientes da sociedade, no caso do aspecto financeiro, e inconscientes, no caso do desempenho térmico das edificações.

1.2 Objetivo geral

O objetivo do presente trabalho é fazer análises econômica e de desempenho térmico de combinações de sistemas construtivos de parede, piso e cobertura para edificações residenciais. Isso será feito a partir da avaliação de três edificações, sendo duas edificações de interesse social e outra edificação de alto padrão, apoiada na utilização de uma metodologia BIM e simulações energéticas.

1.3 Objetivos específicos

Abaixo, são dispostos os objetivos específicos:

- Verificar quais sistemas construtivos (dentre os estudados) promovem uma melhoria no desempenho térmico das edificações modeladas;
- Identificar o impacto econômico em termos de custo da aplicação desses sistemas construtivos;
- Avaliar, de forma simultânea, o impacto em termos de custo e desempenho térmico desses sistemas construtivos na edificação e encontrar aquele(s) mais adequado(s).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Desempenho térmico

Avaliar o desempenho energético de edificações é uma tarefa complexa que envolve grande quantidade de variáveis interdependentes e conceitos multidisciplinares (MENDES, WESTPHAL, *et al.*, 2005). Nesse cenário, a simulação energética por vias computacionais é vantajosa. Por meio dela podemos avaliar o desempenho térmico e energético de edificações para diferentes alternativas de projeto, sejam elas opções do desenho arquitetônico, componentes construtivos, sistemas de iluminação ou sistemas de condicionamento de ar, por exemplo. As simulações energéticas podem ser realizadas por diversos programas como EnergyPlus (ENERGYPLUS, 2022), Fluent (ANSYS, 2022), Phoenics (CHAM, 2022) entre outros. De forma geral todos softwares realizam as simulações a partir da seleção ou inserção de algumas informações como dados climáticos, período de análise, propriedades térmicas dos materiais e componentes e utilização do local. A partir dessas informações realiza-se então a simulação em que obtém-se temperatura interna do ambiente, o que permite estimar o consumo de energia necessário para aquecê-lo ou resfriá-lo.

O desempenho térmico pode ser avaliado por diferentes formas. A NBR 15575 - “Edifícios Residenciais – Desempenho” (ABNT, 2021) recomenda a avaliação por meio do método da carga térmica. Quanto menor a demanda de energia necessária para manter o ambiente interno da edificação em um faixa de temperatura pré-estabelecida, melhor será o desempenho. Essa análise é comumente feita seguindo informações climatológicas de um período de um ano de referência (ABNT, 2021). O resultado da quantidade de energia é usualmente obtido em kWh, podendo ser transformado em custo de energia de acordo com tarifas operacionais da concessionária local (MENDES, 2021). Outro possível método é o dos dias típicos, que consiste na avaliação através de um dia modelo para inverno e um para verão e não sobre o período de um ano. Esse método já foi recomendado pela NBR15575 (ABNT, 2013), porém em suas novas versões essa sugestão foi retirada. Por fim temos o método Graus-Horas que considera todo o ano de referência, comparando a temperatura interna com a externa, nesse método a diferença entre a temperatura

interna e externa é somada, toda vez que essa ultrapassa uma faixa pré-definida (MENDES, 2021).

2.1.1 Contexto histórico no Brasil e no mundo

Como visto, o conforto e saúde dos seres humanos estão diretamente ligados ao desempenho térmico das edificações em que habitam. A preocupação em construir edificações que proporcionam um melhor conforto pode ser observada até mesmo em civilizações mais primitivas, como mostrado por Lamberts et al. (2014) no livro “Eficiência energética na arquitetura”. O autor cita diversas civilizações que buscaram maneiras de melhorar o desempenho térmico de suas edificações, como povo de Mesa Verde no deserto do Colorado que construiu suas habitações nas encostas de pedras que eram sombreadas no verão. No inverno, essas encostas recebiam a incidência de sol devido sua inclinação mais baixa, de modo que os paredões de pedra absorviam o calor durante o dia e o liberavam durante a noite, deixando edificações mais quentes (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Outro exemplo são edificações trogloditas na Tunísia, que eram enterradas evitando extremos de temperatura e protegiam pessoas das tempestades de vento (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014).

Contudo, após a revolução industrial, tivemos mudança drástica no modo de produção de materiais e, assim, na arquitetura das edificações. Sistemas de iluminação e de climatização artificial passaram a ser largamente utilizados, bem como sistemas construtivos padronizados e industrializados, aplicados em larga escala independentemente da localização da edificação (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Essa condição é bastante cômoda para projetistas e construtores, mas possui pouca preocupação na adequação do edifício ao clima e no conforto térmico resultante para os usuários.

Segundo Lim (1983), análises relacionadas ao conforto térmico podem ser rastreadas a estudos ambientais de fábricas e minas no início do século XX. De acordo com o autor, nesse período, foram criadas as primeiras escalas de conforto térmico, investigando a relação entre saúde, conforto e as condições de trabalho.

Nas últimas duas décadas, com o avanço tecnológico e científico, bem como as crises energéticas, pesquisas relacionadas ao desempenho ambiental de edifícios foram cada vez mais incentivadas. Como resultado, diversos países criaram suas regulações para analisar o desempenho térmico de edificações. Como exemplo, temos a norma do Reino Unido, *Building Regulations – Part L* (HM GOVERNMENT, 2010) publicada inicialmente em 1965, que trata da conservação de energia e combustível. Nos Estados Unidos, existe a ASHRAE 55 (ASHRAE, 2017) publicada inicialmente em 1966, que aborda as condições térmicas ambientais para ocupação humana.

Em relação às normas Brasileiras, a NBR 15220 publicada pela primeira vez em 2005, revisada em 2022, sob o título de “Desempenho térmico em edificações”, apresenta definições, símbolos, unidades, métodos de cálculo simplificados para verificação das propriedades térmicas, zoneamento bioclimático brasileiro, diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social etc. (ABNT, 2022). Já a NBR 15575 - “Edificações habitacionais – Desempenho”, publicada em 2008, revisada em 2010, 2012, 2013 e 2021, estabelece uma série de requisitos e critérios para avaliação de desempenho dos sistemas que compõe as edificações. Para desempenho térmico, ela estabelece uma avaliação dando à edificação níveis mínimo (M), intermediário (I) e superior (S). Segundo a última versão da NBR 15575 (2021), a edificação deve atender ao menos o nível mínimo para satisfazer as exigências de utilização do usuário. Kingscott et al. (2021) faz comparativo das normas brasileiras NBR 15220 e a NBR 15575 com a *Building Regulations – Part L*, mostrando que normas brasileiras (publicadas a partir de 2005) são relativamente novas em comparação com a norma britânica. Além disso, a NBR 15575 sofreu uma atualização no ano de 2021 enquanto a *Building Regulations – Part L*, teve cinco atualizações nos anos de 2010, 2011, 2013, 2016 e 2018. Esses fatos geram razões para acreditar que as normas brasileiras estão desatualizadas e limitadas.

Ainda no cenário nacional, a Lei nº 10.295 (BRASIL, 2001), dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia Elétrica. Essa lei discute também a responsabilidade em se elaborar mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações. Temos também o surgimento do Regulamento Técnico da

Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C). Esse regulamento tem como objetivo criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética dos edifícios e, para tanto, especifica os requisitos técnicos e os métodos para classificação dos edifícios comerciais, de serviços e públicos (FOSSATI e LAMBERTS, 2010). Além disso, o Inmetro e a Eletrobras/PROCEL Edifica desenvolveram a Etiqueta PBE Edifica, que faz parte do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). A etiqueta é um selo de conformidade, que evidencia o atendimento aos requisitos de desempenho térmico de edificações comerciais, de serviços ou residenciais, classificando a edificação em faixas de “A” (mais eficiente) até “E” (menos eficiente), além de trazer outras análises sobre a sustentabilidade do empreendimento (INMETRO, 2020).

Araújo et al. (2020) fizeram um levantamento do impacto nacional dos investimentos do Estado, no âmbito da etiqueta PBE-Edifica nos anos de 2009 a 2020. Foi constatado que essa iniciativa acarretou um investimento na área da pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e assessoria técnica. Segundo os autores, o período de 2012 a 2015 foi quando houve maior etiquetagem. Esse número caiu bruscamente nos anos posteriores devido a retração do setor da construção no país e a redução nos investimentos feitos pelo Estado (ARAÚJO, RODRIGUES e PEDRINI, 2020). Ainda assim, observa-se que as construtoras brasileiras não dão a devida atenção ao assunto: no ano de 2013, onde houve maior emissão, somente 936 ENCEs foram emitidas em todo território nacional, enquanto entre 2016 a 2019, menos de 100 ENCEs foram emitidas (ARAÚJO, RODRIGUES e PEDRINI, 2020).

A baixa condição financeira da maioria da população brasileira leva à procura de soluções fáceis e principalmente baratas, resultando em alto índice de autoconstrução no país. Segundo uma pesquisa disponibilizada pelo Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil (CAU/BR) (2015), 54% dos respondentes já construíram ou reformaram um imóvel residencial ou comercial, sendo que 85,4% desse montante fizeram o serviço por conta própria ou sem a responsabilidade de um profissional especializado (CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL, 2015). A combinação destes aspectos acaba deixando alternativas tecnológicas e eficientes

que podem proporcionar melhor desempenho térmico longe das edificações brasileiras.

2.1.2 Alternativas para melhoria do desempenho térmico de uma edificação

Além do que já foi abordado, a melhoria do desempenho térmico de uma edificação está também diretamente relacionada com o ambiente que ela está inserida. A favor da eficiência energética, é interessante buscar estratégias de resfriamento e aquecimento naturais, ponderando as necessidades da edificação diante das condições de exposição do clima. Lamberts et al. (2014) trazem diversas estratégias para aquecimento e resfriamento de edificações, como visto abaixo:

Para aquecimento:

- Aumentar o ganho de calor solar: aumentar as dimensões das esquadrias, fazer estudo da orientação solar, utilizar sistemas de paredes e pisos translúcidos, utilizar cores escuras, projetar pátios e átrios e prover forma semicircular à edificação;

Para resfriamento:

- Aumentar a ventilação: aumentar dimensões das aberturas e prever *sheds* ou *Lanternins* à edificação;
- Promover resfriamento evapotranspirativo: utilizar floreiras suspensas e jardins verticais;
- Minimizar incidência solar: aumentar áreas de sombreamento com toldos, beirais e outros elementos;
- Promover troca de calor com solo e reduzir o fluxo de calor para ambiente: projetar moradias semienterradas.

Um dos principais fatores que influenciam o desempenho são as propriedades térmicas dos materiais de vedação, já que essas ditam a transferência e armazenamento de energias das envoltórias. Entre as propriedades térmicas dos materiais de construção que influenciam significativamente em seu desempenho térmico, podemos citar a inércia térmica (MOHAMMAD e SHEA, 2013). Ela está diretamente relacionada à capacidade do material de armazenar e liberar calor e pode ser explicada através de dois fenômenos, a redução da amplitude térmica e o atraso

térmico (VERBEKE, 2017). Uma edificação com alta inércia térmica tem baixa amplitude térmica nos ambientes internos e uma defasagem da temperatura interna com a externa (PROJETEEE, 2022).

A transmitância térmica corresponde à transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo (ABNT, 2021). A partir dela podemos analisar e comparar a capacidade de transmitir calor de diferentes sistemas construtivos. Por sua vez, o isolamento térmico é uma propriedade relacionada à resistência térmica do material. Ela é a capacidade do material de resistir à passagem do calor (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Logo, um ambiente com alto isolamento térmico sofrerá menor influência do seu exterior.

A NBR 15220 (ABNT, 2022) estabelece diretrizes construtivas para cada região bioclimática do Brasil. Além dessa norma prever o tamanho das aberturas para ventilação e o tipo de sombreamento das aberturas, ela também dispõe as diretrizes para os fechamentos (internos e externos) da edificação. Como exemplo, a norma prevê para regiões mais frias (Zona Bioclimática 1 e 2), envoltórias externas com paredes e coberturas leves (paredes com transmitância térmica $U \leq 3,00\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e coberturas com transmitância térmica $U \leq 2,00\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), enquanto os fechamentos internos devem ser pesados (Transmitância térmica $U \leq 2,20\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) para garantir inércia térmica. Já, para uma região mais quente e seca, é recomendado que as edificações tenham cobertura e paredes (internas e externas) pesadas (paredes com transmitância térmica $U \leq 2,20\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e coberturas com transmitância térmica $U \leq 2,00\text{W/m}^2\cdot\text{K}$), de modo a garantir bastante inércia térmica. Em regiões quentes e úmidas já recomenda-se utilizar paredes e coberturas mais leves e refletoras (paredes com transmitância térmica $U \leq 3,60\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ e coberturas com transmitância térmica $U \leq 2,30\text{W/m}^2\cdot\text{K}$) (ABNT, 2022).

Contudo, a própria norma NBR 15220 (ABNT, 2022) esclarece que não trata da avaliação de desempenho térmico, mas, sim, de recomendações aplicáveis na fase de projeto que beneficiam o desempenho da edificação. Como exposto anteriormente, no cenário atual, as normas nacionais e internacionais baseiam-se principalmente em simulações computacionais para avaliar o desempenho térmico das edificações.

Como exemplos de estudos de caso nessa área, Viana et al. (2019) verificaram que, para estruturas de container, algumas adaptações melhoraram significativamente o desempenho térmico. Ao avaliar a temperatura interna propiciada pela estrutura com camadas isolantes de fibra cerâmica, lã de rocha, isopor e lã de vidro nos fechamentos externos, os autores observaram resultados semelhantes, com uma redução de 0,8°C para o dia típico de verão e um aumento de 1,5°C para o dia típico de inverno. Já ao avaliar o fechamento com câmara de ar (em isolamento), os autores obtiveram um melhor resultado, tendo uma redução na temperatura interior de 1°C para o dia típico de verão e um aumento de 2,1°C para o dia típico de inverno.

Pasa et al. (2012) verificaram a influência que os materiais construtivos presentes nos fechamentos manifestam na quantidade de energia requerida para manutenção do conforto térmico. Os autores variaram o tipo de bloco cerâmico nas paredes e o tipo de forro na cobertura da edificação e avaliaram o desempenho por meio do consumo de carga térmica para manter uma faixa de temperatura interna entre 20 e 22 °C para graus-dias de aquecimento e 23° e 25° para graus-dias de resfriamento. Os autores verificaram, dentre as combinações simuladas, que o bloco maciço e o forro de concreto de 3 cm garantiram o melhor desempenho térmico, tanto para aquecimento quanto para resfriamento, totalizando consumo para resfriamento de 64,48 kWh/ano e para aquecimento de 7804,22 kWh/ano. Por sua vez, a combinação de tijolo de 6 furos e sem forro tiveram o pior resultado, totalizando consumo para resfriamento de 111,20 kWh/ano e para aquecimento de 13458,07 kWh/ano.

Besen et al. (2014) verificaram através de simulações energéticas utilizando software EnergyPlus a influência da variação de tipos de vidro para eficiência energética de um edifício comercial de escritórios em seis cidades brasileiras: Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo. Para a análise foram considerados 36 tipos de vidro sendo eles monolíticos, laminados e camadas de vidro com câmara de ar. Os autores também consideraram a viabilidade econômica da sua implantação. Para cada cidade, os autores encontraram um vidro economicamente viável, que proporcionaria uma melhor eficiência energética. A maior economia absoluta em consumo de energia para condicionamento interno ocorreu na cidade de Fortaleza, onde a utilização de um vidro insulado triplo com espessuras de

6+12+6mm poderia gerar uma economia 349 MWh em relação ao vidro incolor monolítico de 6mm, que corresponde a um custo anual de aproximadamente R\$ 183.000,00.

Torres et al. (2014) analisaram o comportamento de diferentes modelos de esquadrias no desempenho energético de habitações no Rio de Janeiro seguindo método prescrito do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (BRASIL, 2012). Para a análise, foram variados quatro modelos de esquadrias, combinando o sistema de abertura (correr ou abrir) com o sombreamento interno (com ou sem venezianas), em diferentes orientações, sendo resultados obtidos em GRH (Graus-hora de resfriamento). Como resultado tiveram, então, que o modelo de abrir proporciona aumento da eficiência energética em 24% com relação ao modelo de correr, devido maior área de ventilação. Essa porcentagem aumenta com a consideração das venezianas, que proporcionam sombreamento, atingindo melhoria de 140% da eficiência energética quando comparada a um modelo de correr sem venezianas.

Todos esses autores verificaram que com pequenas alterações no modo construtivo é possível melhorar o desempenho energético de uma edificação, levando a uma temperatura mais confortável para os usuários e economia de energia que seria utilizada para resfriamento ou aquecimento mecânico. Entretanto, poucos trabalhos avaliaram a viabilidade econômica das estratégias investigadas. A comparação dos custos de diferentes sistemas construtivos, bem como o tempo de retorno do investimento quando comparado a economia de energia, são fatores indispensáveis para tomada de decisão.

2.2 BIM – *Building Information Modeling*

2.2.1 Definições, vantagens e desafios

Eastman et al. (2008) nos trazem uma definição filosófica sobre BIM, na qual o BIM não é um elemento ou um tipo de software, mas uma atividade humana que envolve mudanças amplas nos processos de construção. Entretanto, os autores também trazem uma discussão mais prática – “eles definem BIM como uma tecnologia

de modelagem e um conjunto associado de processos para produzir comunicar e analisar modelos de construção” (EASTMAN, TEICHOLZ, *et al.*, 2008). Já Campestrini *et al.* (2015) definem BIM “como um processo baseado em modelos paramétricos da edificação, visando a integração de profissionais e sistemas com interoperabilidade de dados e que fomenta o trabalho colaborativo entre as diversas especialidades envolvidas em todo o processo, do início ao fim” (CAMPESTRINI, GARRIDO, *et al.*, 2015). Ambos os autores abordam o BIM como modelos de construção e análise dos mesmos.

Para a completa compreensão do BIM, é necessário o entendimento de dois conceitos: parametrização e interoperabilidade. Modelo paramétrico é a representação computacional de um desenho construído com elementos geométricos que possuem atributos (propriedades) fixos ou variáveis (HERNANDEZ, 2005). Eastman *et al.* (2008) definem parametrização como uma série de definições geométricas, dados e regras associados que modificam automaticamente as geometrias associadas. Segundo os autores, os objetos paramétricos podem ser definidos em diferentes níveis de agregação e tem habilidade de vincular-se, receber, divulgar ou exportar conjunto de atributos. Por exemplo, em aplicativos CAD, uma janela é desenhada como diversas linhas paralelas e perpendiculares (o usuário sabe que é uma janela devido às convenções de desenho técnico). Em BIM, esse agrupamento de linhas é definido como um objeto “janela”, ao qual também pode ser atribuído peso, custo, propriedades termofísicas, etapa de instalação no cronograma, entre outros.

A interoperabilidade, por sua vez, diz respeito à capacidade de diferentes sistemas e softwares trocarem informação entre si de forma que essa seja corretamente interpretada e possa ser utilizada, sem perdas ou sobreposição nos diferentes aplicativos (COELHO, 2013). Voltando ao exemplo anterior, uma janela desenhada em um aplicativo BIM será lida como tal em quaisquer outros softwares que usem essa metodologia, e isso servirá de base para cálculos estruturais, de custos, de balanço energético etc.

A utilização da metodologia BIM de forma adequada pode trazer inúmeras vantagens durante todo o ciclo de vida de uma edificação. Eastman *et al.* (2008)

separa esses benefícios nas diferentes etapas de um projeto apresentados, resumidamente, a seguir:

- Apresentação de pré-projeto: facilita a demonstração de conceitos, viabilidade e benefícios de um projeto, possibilitando aumento de qualidade e desempenho da construção;
- Execução de projeto: permite visualização do projeto com antecedência, executa automaticamente mudanças simples, gera desenhos 2D consistentes em qualquer fase do projeto, permite que múltiplas disciplinas colaborem entre si na confecção do projeto, verifica de forma facilitada se as solicitações de clientes e regulações foram atendidas, extrai estimativas de custo durante a etapa de projeto e incrementa eficiência energética e a sustentabilidade por meio de processos simplificados.
- Da construção à fabricação: sincroniza etapas e planejamento da construção, identifica de erros de projeto e omissões antes da construção (conferência de compatibilidade), permite reação rápida a problemas de projeto ou do canteiro, utiliza o modelo de projeto como base para componentes fabricados, melhora a implementação e técnicas de construção, sincroniza a aquisição de materiais com projeto e a construção.
- Pós-construção: melhora o gerenciamento e operação das edificações, integra os sistemas de operação e manutenção.

O BIM envolve um entendimento da metodologia por todos os envolvidos e a elaboração de práticas que devem ser compreendidas e utilizadas por todos para assim melhorar o fluxo de informações (EASTMAN, TEICHOLZ, *et al.*, 2008). O BIM pode ser aplicado com a utilização de diversos softwares. Alguns softwares possuem interface ampla e podem ser utilizados para inúmeras aplicações, como Autodesk Revit, que pode ser utilizado para elaboração de projetos arquitetônicos, estrutural, hidráulico, elétrico e inúmeros outros (AUTODESK, 2022). Já outros softwares possuem limitações e só podem ser utilizados para elaboração de projetos específicos, como Eberick da Empresa AutoQi, no qual só é possível fazer projetos estruturais (AUTOQI, 2022). Alguns outros desafios podem se apresentar ao se migrar do método convencional CAD para o BIM. Segundo Estman et al. (2008), os principais

desafios estão relacionados à colaboração de equipes, mudança na mentalidade e práticas correntes e no uso da informação e mudanças legais ligadas à propriedade das informações.

Além disso, percebemos no cotidiano de trabalho com BIM que algumas definições são meramente arbitrárias, variando muito de literatura. Essas definições precisam ser consideradas e esclarecidas antes de qualquer atividade, caso contrário, podem surgir alguns empecilhos e desentendimentos. Uma dessas definições é o termo “LoD”, utilizado em diversas literaturas com conceitos ligeiramente diferentes, sendo como *Level of Detail* (em português, Nível de Detalhamento) ou *Level of Development* (Nível de Desenvolvimento) (BIMFORUM, 2022). Kempter et al. (2015), por exemplo, definem LoD como *Level of Detail*, sendo a quantidade de informação necessária para a representação de um determinado elemento. Ciribini (2013) define LoD seguindo os dois conceitos, mas referindo *Level of Detail* à quantidade de informações ou detalhes inseridos no projeto, enquanto *Level of Development* é referido como o grau em que detalhes e informações foram pensadas e processadas, fazendo referência à confiabilidade dessas informações.

Considerando essas variações em alguns conceitos e a falta de um método para quantificar, o *American Institute of Architects* (AIA) publicou, em 2013, o *AIA’s G202 Project BIM Protocol Form* (AIA, 2013), numa tentativa de padronizar e estabelecer conteúdos mínimos que um modelo em BIM deve possuir para cada nível estabelecido. A AIA (2013) estabeleceu então cinco níveis de detalhamento, sendo LoD 100, LoD 200, LoD 300, LoD 400 e LoD 500. Quanto mais alto o valor, mais informações o modelo irá conter. Por exemplo, um pilar de concreto armado modelado em um LoD 100 irá conter somente sua volumetria e o tipo de material. Se ele for modelado em LoD 400, irá conter, também, as armaduras, as características do aço e do concreto que o compõe. Esse documento vem sendo constantemente atualizado pela organização BIMFORUM² (última versão data de 2021), incluindo, ainda, níveis intermediários, como exemplo, o LoD 250 (BIMFORUM², 2021).

O AIA’s G202 (2013) serviu como referência para direcionar e qualificar modelos em BIM em todo o mundo (CAMPESTRINI, GARRIDO, *et al.*, 2015). No Brasil o BIM é algo recente e não existe nenhuma norma que oriente como quantificar ou classificar

modelos. Os poucos cadernos normativos que abordam esses conceitos como o Caderno de Especificações de projetos em BIM (2018), publicado pelo Governo do Estado de Santa Catarina, fazem referência ao documento publicado pela AIA.

2.2.2 BIM no Brasil

A disseminação da metodologia BIM no país teve origem no início dos anos 2000 (RUSCHEL e ANDRADE, 2009). Ruschel et al. (2009) ainda destacam que nessa época no Brasil as pesquisas sobre BIM eram recentes e, mesmo as empresas que o utilizavam ainda eram limitadas a somente ambiente interno do escritório. De forma cronológica, em 2010 houve a criação da ISO – 12006-2 (ABNT, 2010), “Construção de edificações – Organização de informações da construção: Estruturas para classificação de informação”, em uma tentativa incentivar e disseminar a metodologia BIM. Em 2011, foi publicada a NBR 15965-1 (ABNT, 2011), “Sistemas de classificação de informação de construção: Terminologias e estruturas”, com o objetivo de regulamentar o uso do BIM. Um estudo publicado em 2016 identificou um aumento da utilização do BIM, principalmente nas etapas de projetos e para extração de quantitativos (RIBEIRO, BARRETO, *et al.*, 2016). Ribeiro et al. (2016) ressaltam, em sua pesquisa, a falta de incentivos por parte do governo e o alto custo dos softwares que utilizam a metodologia BIM.

Em maio de 2018 foi instituído o decreto Nº 9.377 (BRASIL, 2018), com objetivo de promover investimentos e difundir o BIM no país. Com a legislação em vigência, foi criada a Câmara Brasileira de BIM (CBIM), com o intuito de discutir as políticas públicas de implantação e disseminação do BIM no setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (SODRÉ, 2021). Já em 2 de abril de 2020, foi publicado o decreto Nº 10.306 (BRASIL, 2020), que estabelece a utilização do BIM na execução direta ou indireta de obras e serviços de engenharia realizada pelos órgãos e pelas entidades da administração pública federal. Um ano depois, em abril de 2021, se publicou a Lei Nº 14.133 (BRASIL, 2021) que dita, nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura, a preferência de aceitação de projetos que façam uso do BIM.

Vemos, assim, que o incentivo dos órgãos governamentais pela utilização do BIM é bem recente. O decreto Nº 10.306 (BRASIL, 2020) e a Lei Nº 14.133 (BRASIL,

2021) possuem grande importância para a difusão e regularização do conceito BIM no âmbito nacional. Com a disseminação da lei, o uso da tecnologia gradativamente se tornará obrigatória. Por conseguinte, o decreto representa um significativo avanço para o setor construtivo no país, seja no planejamento ou execução e obras, além de simbolizar um aspecto positivo para a economia nacional (SODRÉ, 2021).

Após a publicação do decreto Nº 9.377 (BRASIL, 2018), houve a criação do BIM Fórum Brasil, uma associação civil de âmbito nacional, neutra, sem fins lucrativos com objetivo de disseminar o conceito e prática do BIM no país. No dia 13 de setembro, o BIM Fórum Brasil publicou uma pesquisa em âmbito nacional junto ao Sistema CONFEA/CREA/Mútua, à ABDI, e ao CAU Brasil (BIM FORUM BRASIL, 2022). A pesquisa buscou quantificar a utilização do BIM no país, segundo a pesquisa mais de 10.000 profissionais foram consultados em todas 27 unidades da federação. Destes profissionais, 56-57% dos engenheiros e arquitetos pesquisados declaram estar na fase inicial de adoção do BIM e entre 23-36% manifestaram já ter desenvolvido projeto em BIM (BIM FORUM BRASIL, 2022). Com isso, observamos o panorama crescente da utilização da metodologia no país.

2.2.3 Dimensões do BIM

Outra definição comumente utilizada por profissionais dessa área são as dimensões do BIM. Os D's do BIM, como também são conhecidos, buscam avaliar o quão abrangente o modelo é, considerando todo o ciclo da construção. Essas dimensões se referem a como o modelo está programado, como foi construído e, conseqüentemente, os tipos de informação que podem ser retiradas (CAMPESTRINI, GARRIDO, *et al.*, 2015). Cada uma dessas dimensões engloba determinadas etapas e processos específicos do ciclo de vida das edificações (SILVA, BALZ e PEDROZO, 2021).

A definição de cada dimensão varia de acordo com literatura ou organização, as definições abaixo citadas estão em concordância com as definições de Silva et al. (2021), Jereissat et al. (2020) e Piaseckiene (2022), por exemplo:

- BIM 2D: semelhante método tradicional CAD, trata da documentação e representação em duas dimensões;
- BIM 3D: representação de modelos em 3 dimensões, exibindo assim volumetria, dando destaque à representação paramétrica que começa a ser utilizada;
- BIM 4D: inclusão do fator tempo, utilizado para fazer planejamento da execução da obra;
- BIM 5D: adição de custos dos insumos, com extração de quantitativos do modelo alinhado a dados orçamentários que nos permite uma estimativa de custos muito próximas da realidade.
- BIM 6D: consideração da sustentabilidade, na qual avalia-se o desempenho térmico da edificação, leva-se em conta utilização de recursos renováveis, reuso e reciclagem de resíduos.
- BIM 7D: inclusão da gestão da edificação durante sua utilização, com foco na manutenção e operação; estabelece cronogramas de manutenção de forma a garantir máximo de vida útil da edificação, garantindo segurança, desempenho e conforto.
- BIM 8D: inserção de elementos de segurança e prevenção de acidentes, incluindo simulações de risco, facilitando a elaboração de medidas preventivas.

Além destas dimensões, duas novas surgiram recentemente e estão sendo amplamente discutidas (JEREISSAT, CAVALCANTE, *et al.*, 2020), (PIASECKIENÉ, 2022):

- BIM 9D: aplicação do *Lean Construction* de modo a otimizar e agilizar todo processo de execução, com objetivo de reduzir desperdícios e resíduos, bem como maximizar a produtividade;
- BIM 10D: inclusão processo de industrialização da construção, resumindo-se em integrar tecnologias e processos que possam tornar processo de construção cada vez mais automatizado e assim aumentar a produtividade e qualidade do produto final.

Um projeto elaborado com a quinta dimensão do BIM (BIM 5D) permite que variações no projeto e alteração dos materiais possam ser feitas de forma a avaliar também sua viabilidade financeira, já que o modelo permite a extração de quantitativos de forma simples, que por sua vez estará ligada ao banco de dados orçamentários do projeto (PIASECKIENÉ, 2022). Essa vinculação também pode ser utilizada para avaliar impactos no custo do projeto devido à oscilação do preço dos insumos ou alteração dos mesmos, fornecendo assim projeções precisas, facilitando o processo de tomada de decisão a respeito da viabilidade econômica do empreendimento (PIASECKIENÉ, 2022).

Já um projeto elaborado com a sexta dimensão do BIM (BIM 6D) nos proporciona uma análise de sustentabilidade da edificação. Esse irá receber informações sobre a validade dos materiais, os ciclos de manutenção, o consumo de água e energia elétrica, entre outros (CAMPESTRINI, GARRIDO, *et al.*, 2015). Nessa dimensão é possível, em especial para esse trabalho, fazer simulações para avaliar o desempenho energético da edificação durante sua utilização, sistemas de iluminação e ventilação naturais e artificiais, tornando possível realizar alterações ainda na etapa de projeto, para que se tenha uma edificação confortável e eficiente (MONTIEL-SANTIAGO, HERMOSO-ORZÁEZ e TERRADOS-CEPEDA, 2020). A utilização de fontes de energia solar, aproveitamento de água de chuva ou adequações ao projeto para proporcionar um melhor conforto térmico são exemplos de alternativas que podem vir a surgir nesta fase. Oliveira et al. (2020) propuseram uma ferramenta denominada IDEEA, capaz de realizar simulações de eficiência energética de edificações ainda em fase de elaboração do projeto arquitetônico. Grande parte das ferramentas deste tipo são utilizadas para examinar etapa final de projeto para obtenção da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Após a análise, muitas vezes são necessárias alterações ou adaptações no projeto para que se obtenha valores desejados, causando um aumento no orçamento e cronograma da edificação. O IDEEA pode ser utilizado juntamente com software Revit (AUTODESK, 2022), e permite acompanhar a eficiência energética da edificação desde as primeiras concepções arquitetônicas, auxiliando tomadas de decisões.

Como podemos notar, a metodologia BIM busca sempre melhorar o processo construtivo. Além de reduzir a possibilidade de erros através da compatibilização das diferentes disciplinas, a facilidade de se analisar o impacto das alterações no projeto considerando diferentes perspectivas resulta grande aumento na produtividade.

2.2.4 BIM para seleção de alternativas e orçamentação

Um orçamento pode ser definido com a determinação dos gastos necessários para realização de um projeto, de acordo com um plano de execução previamente estabelecido (LIMMER, 1996). O orçamento é um documento valioso em qualquer estudo preliminar ou de viabilidade. Uma obra iniciada sem a definição de seu custo e dos recursos necessários pode resultar numa obra inacabada (CARDOSO, 2020). O orçamento estará diretamente ligado a viabilidade e gestão de possíveis interrupções ou problemas que possam vir a surgir, sendo parte imprescindível para construção civil.

Como exemplo do uso dessa metodologia, Machado et al. (2018) propuseram o uso do software de plataforma BIM associado ao método AHP (*Analytic Hierarchy Process*) para auxiliar na escolha do sistema construtivo mais adequado para uma edificação de interesse social na cidade de Curitiba, durante a fase de projeto. Para essa escolha, os autores ponderaram a emissão de CO₂, tempo de execução, custo de execução, disponibilidade de mão de obra e matéria prima relacionados a cada sistema. Três sistemas construtivos foram analisados: alvenaria estrutural, estrutura em aço e estrutura em madeira. A modelagem do projeto em BIM permitiu simulações de diferentes cenários e facilitou a extração de dados, possibilitando, satisfatoriamente, a escolha do sistema mais otimizado. No caso do estudo, a estrutura em aço teve o melhor destaque.

Brito et al. (2017) utilizaram algoritmos generativos por meio da programação visual para estimativas de custo com base em modelos BIM, visando auxiliar a tomada de decisão na etapa do processo criativo. Ressalta-se que, segundo os autores, a ferramenta se mostrou satisfatória para levantamento de quantitativos visando estimativas de custos em fases iniciais de projeto, além de ter permitido o estudo de diversos cenários com relativa rapidez. O estudo abordou diferentes soluções

estruturais para uma mesma edificação sendo elas: fundação e demais componentes estruturais em madeira, estrutura toda em madeira e estrutura toda em concreto armado. Como resultado, a equipe percebeu que a estrutura toda em concreto se mostrou mais viável economicamente.

Sena et al. (2022) utilizaram BIM 4D (i.e., inclusão de cronograma da obra) e 5D (avaliação orçamentária do projeto) para selecionar a melhor alternativa de cimento na execução de um edifício. Os cimentos considerados foram o CP III e o CP V-ARI. Os parâmetros considerados foram o custo e o tempo necessário do escoramento, além do custo de execução da obra com o cimento e do tempo para que cada concreto atingisse a resistência de 30 MPa. Os autores verificaram no mercado que o custo da execução com o cimento CP V-ARI é 6% maior que o do CP III, porém o CP V-ARI atinge resistência para desforma mais rápido, resultando em uma economia que pode alcançar 20% no custo global da estrutura. Essa opção também resulta na economia com contratos que pode chegar a 10% e maior velocidade de execução da obra, resultando numa redução 7% do tempo de execução. Assim, Sena et al. (2022) concluíram em seu estudo que a utilização do CP V-ARI é a melhor opção.

Pacheco et al. (2018) realizaram uma análise de custo e desempenho térmico de diferentes sistemas de cobertura e esquadrias de um projeto de habitação de interesse social (HIS) no Estado de Goiás. Os autores utilizaram o software *DesignBuilder* para simulação térmica e planilhas eletrônicas tendo como base tabelas de custos unitários da SINAPI, AGETOP e AGEHAB para análise financeira. Verificou-se que os sistemas de esquadrias não apresentavam grande influência no desempenho térmico da edificação escolhida, tornando possível por exemplo uma economia de R\$ 2.570,37 na construção, ao substituímos portas de madeira por portas de chapa metálica. Já o sistema de cobertura apresenta maior impacto no desempenho térmico da edificação dentre a três coberturas analisadas (fibrocimento, cerâmica e sanduiche): a diferença da temperatura interna chegou a 2,6°C entre a telha sanduiche, que obteve o melhor resultado, e a fibrocimento, que obteve menor resultado. Ao comparar custos destas duas telhas, a telha sanduiche

apresentou um custo maior que a telha de fibrocimento de R\$ 4.489,31, algo bastante significativo para uma HIS.

Dentre trabalhos analisados, não foi encontrado nenhum estudo que utiliza dimensões 5D e 6D para análise de custos e desempenho térmico das edificações no Brasil. Ressalta-se a importância da metodologia BIM para essas análises já que interoperabilidade presente entre diferentes softwares irá reduzir a possibilidade de erros e assim garantir melhores resultados.

3 METODOLOGIA

3.1 Panorama Geral

Este trabalho busca avaliar o desempenho térmico e custo de combinações de diversos sistemas construtivos (de paredes, pisos e coberturas) em edificações residenciais no Brasil. Para isso, fizemos um estudo de caso de duas habitações de interesse social e uma residência de alto padrão. Em linhas gerais, buscamos otimizar as combinações de desempenho térmico com um custo racionado.

Para as análises, foram realizadas simulações de desempenho térmico e avaliação orçamentária por meio do software Autodesk Revit (versão 2021, de estudante). Inicialmente foi feita a modelagem arquitetônica, com inclusão de custos para execução dos elementos variáveis, incluindo serviços e insumos para avaliação orçamentária. Foram especificados diferentes sistemas construtivos nas paredes, cobertura e pisos das edificações, que serão descritos a seguir. Para cada sistema construtivo foi feita a simulação energética, durante o período de um ano na cidade de São Paulo (zona bioclimática 3). A Figura 1 apresenta um panorama geral da metodologia aplicada nesse trabalho.

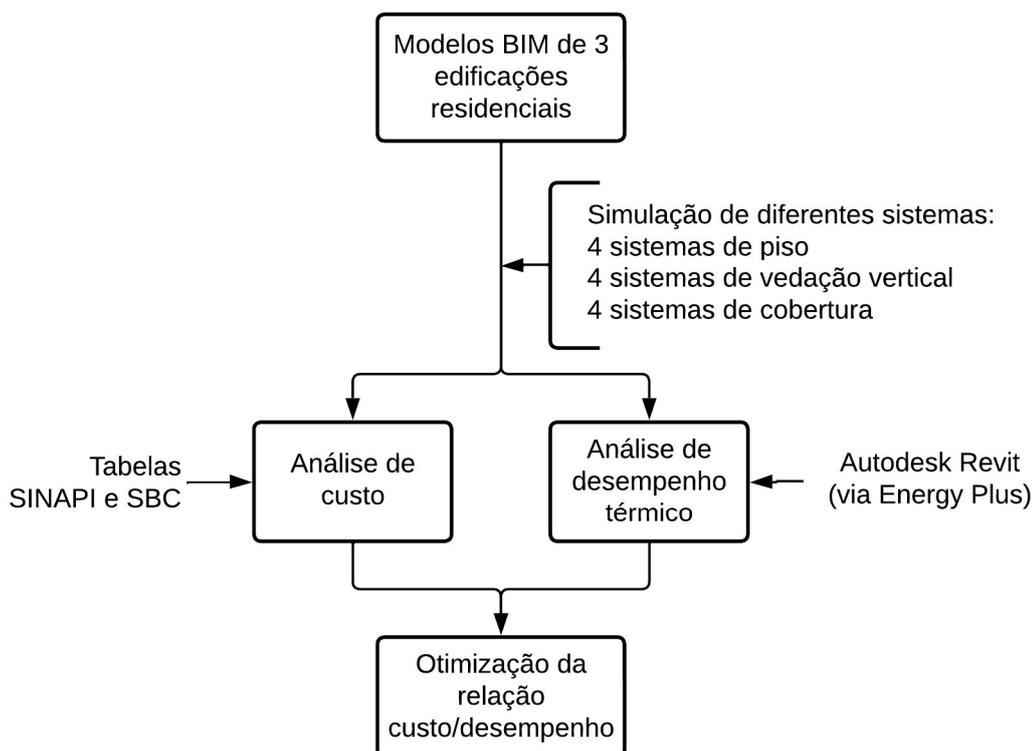


Figura 1: Fluxograma. Fonte: autor.

3.2 Projetos arquitetônicos

Para simulação, optou-se por uma habitação de interesse social (HIS) unifamiliar com um único pavimento que pode ser observada na Figura 2, uma outra HIS de mesmo padrão e layout diferenciado, Figura 3, e uma edificação de alto padrão, Figura 4 e Figura 5.

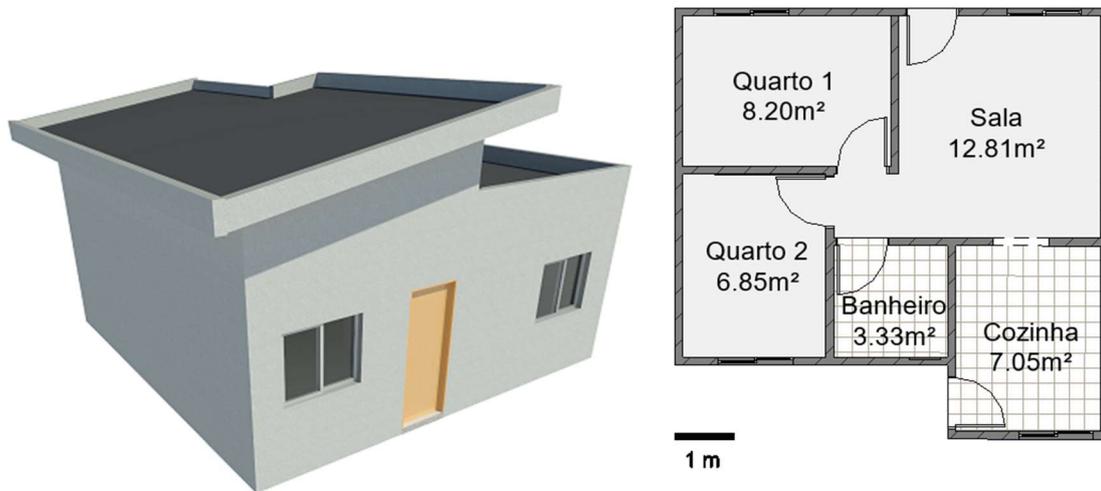


Figura 2: Modelo 3D e Planta da habitação de interesse social adaptada da Vila Sustentável (HIS 1). Fonte: (FRANCO, MENDES, *et al.*, 2019) adaptado pelo autor.

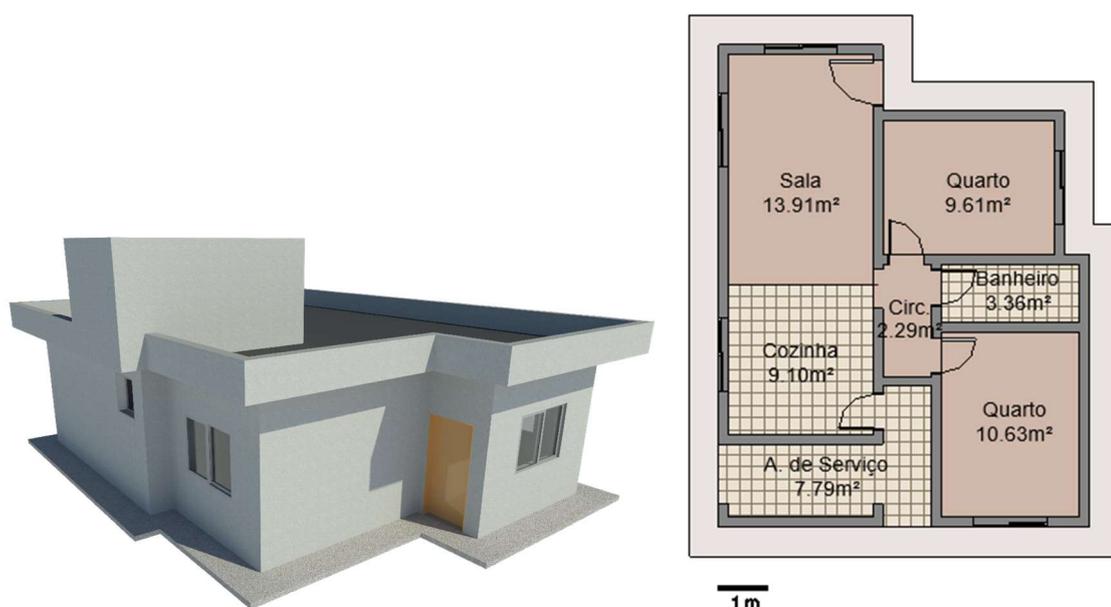


Figura 3: Modelo 3D e Planta da Edificação de interesse social adaptada da Engeplena (HIS 2). Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.

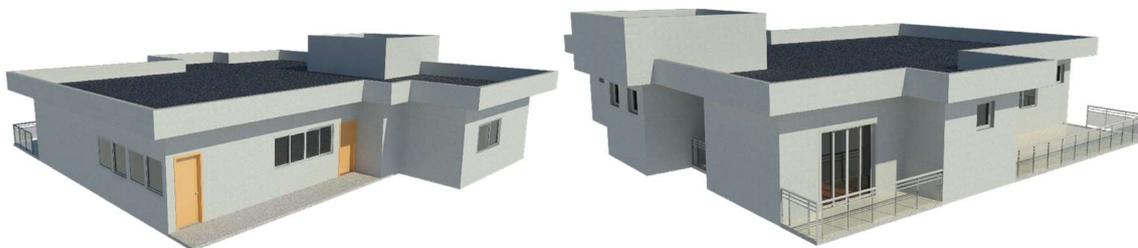


Figura 4: Modelo 3D edificação de alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.

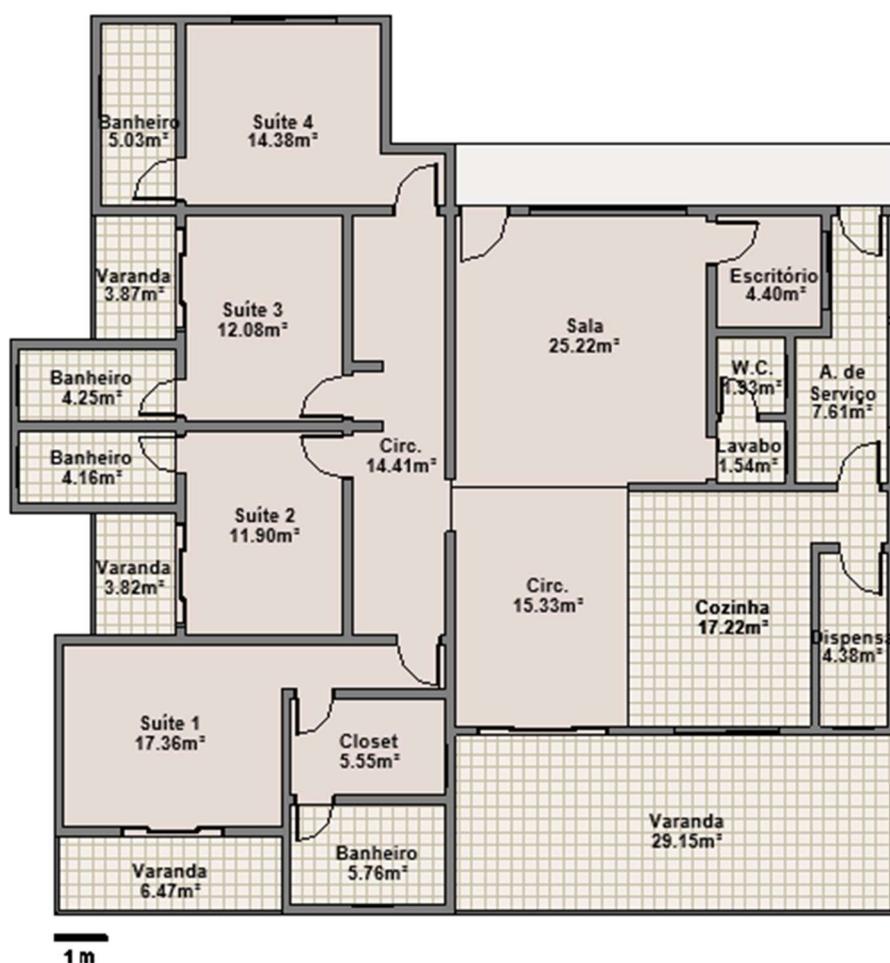


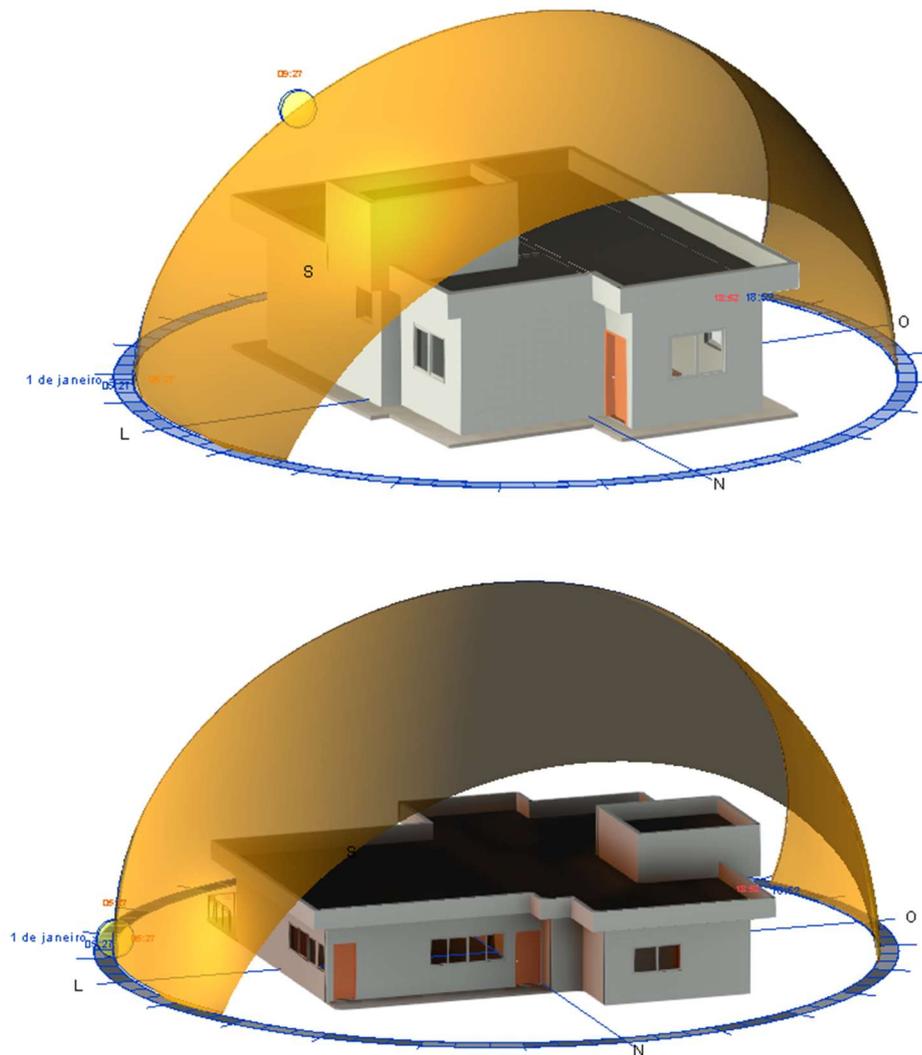
Figura 5: Planta edificação alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: Engeplena (2022), adaptada pelo autor.

O projeto da unidade de interesse social apresentado na Figura 2 foi adaptado da Vila Sustentável apresentada por Franco et al. (2019). Para equivaler melhor à realidade das construções de interesse social no Brasil, desconsideramos o telhado verde e o efeito chaminé da residência que foram previstos por Franco et al. (2019). Os outros dois projetos (Figura 3, Figura 4 e Figura 5) foram adaptados de projetos elaborados pelo autor durante seu período de estágio e cedidos pela empresa Engeplena Engenharia Ltda (de Itabirito/MG), com autorização de seu responsável técnico, Eng. Antônio Carlos Cunha Júnior. Para a utilização neste trabalho, as edificações foram postas em contato direto com o solo, separada somente pelo contrapiso. Nos modelos, não houve previsão de nenhum elemento circundante à edificação que provocasse sombreamento na mesma (ex. vegetação), com exceção dos beirais que possuem 80cm em todos os modelos.

Como é observado, a HIS 1 apresentada na Figura 2 contém dois quartos, um banheiro, uma sala, uma cozinha e uma pequena área de circulação, com pé direito variável devido laje inclinada sobre a sala e a cozinha e uma área total de 44 m². Já a HIS 2 presente na Figura 3 contém dois quartos, um banheiro, uma sala, uma cozinha, uma pequena área de circulação e uma área de serviço externa com um pé direito de 3 m e uma área total de 67 m². Sobre o banheiro, é projetado uma pequena torre de caixa d'água. Por sua vez, a edificação de alto padrão (Figura 4 e Figura 5) contém quatro suítes sendo uma com closet, um lavabo, uma sala, um escritório, uma cozinha, uma despensa, um corredor que dá acesso as suítes e uma área de serviço interna com um pé direito de 3 m. Ela possui ainda quatro varandas, sendo que as três menores são acessíveis pelas suítes e a maior pela área de circulação próxima a cozinha. Essa habitação compreende uma área total de 243 m². Sobre os banheiros das suítes centrais, é projetado uma pequena torre de caixa d'água.

Para a exposição climática da edificação, escolheu-se a cidade de São Paulo, localizada na zona bioclimática 3 (ABNT, 2022). Essa escolha é justificada devida elevada concentração demográfica da região, sendo a maior do país, aumentando a

significância dos resultados obtidos neste trabalho. As edificações foram orientadas para que sua fachada principal ficasse virada para Norte Geográfico. A Figura 6 apresenta o estudo solar das edificações ao longo de um ano.



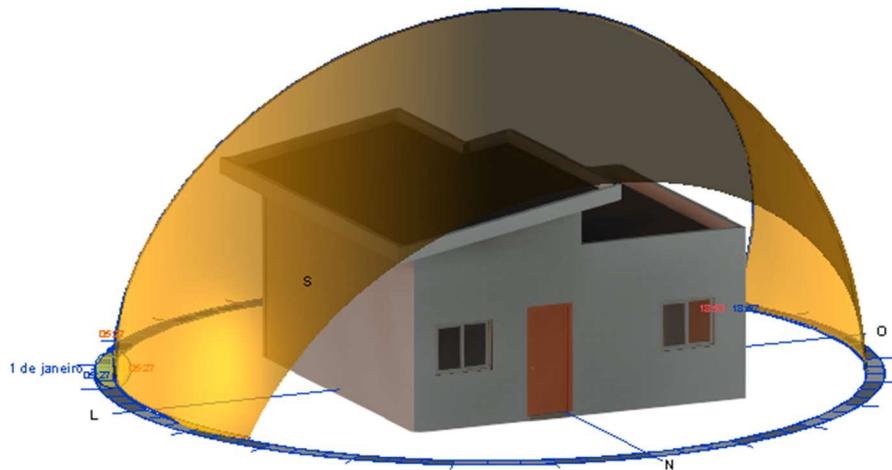


Figura 6: Esquema solar e orientação das edificações. Fonte: autor.

3.3 Composição das envoltórias

Para composição das envoltórias, foram considerados os sistemas construtivos mostrados na Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3. Foram definidos 4 sistemas construtivos para as paredes, 4 para o piso e mais 4 para a cobertura, totalizando 64 combinações de sistemas construtivos para implementar em cada edificação em foco.

A escolha desses sistemas se deu pela aplicação das técnicas por parte dos brasileiros em geral ou pelo amplo conhecimento dessas por especialistas do ramo da construção civil. Para fins orçamentários, as variações no sistema de piso não serão aplicadas ao banheiro e à área de serviço, dado que no Brasil utiliza-se majoritariamente pisos cerâmicos nesses ambientes independentemente do restante da casa. Vale ressaltar que somente os ambientes de longa permanência são de interesse nas análises de desempenho térmico de edificações (ABNT, 2021). Além disso, foi previsto para todas as paredes uma pintura que garanta aos elementos verticais aparentes uma absorvância intermediária, considerando $\alpha = 0,5$ (ABNT, 2022).

Tabela 1: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de paredes.

Sistema	Descrição do sistema (do exterior para o interior)	e (cm)	ρ (kg/m³)	λ (W/(m·K))	c (kJ/(kg·K))
1.1 Bloco cerâmico 9cm + Argamassa U = 2,5 W/(m ² ·K) CT = 116,5 kJ/(m ² ·K)	Argamassa de revestimento	2	1950	1,15	1
	Bloco furado cerâmico com 1cm argamassa de assentamento ^(a)	9	459,82	0,47	0,93
	Argamassa de revestimento	2	1950	1,15	1
1.2 Bloco de concreto 14cm + Argamassa U = 2,9 W/(m ² ·K) CT = 195,7 kJ/(m ² ·K)	Argamassa de revestimento	2	1950	1,15	1
	Bloco furado de concreto com 1cm de argamassa de assentamento ^(a)	14	840,79	1,01	1
	Argamassa de revestimento	2	1950	1,15	1
1.3 Paredes de concreto U = 4,4 W/(m ² ·K) CT = 230,0 kJ/(m ² ·K)	Parede de concreto	10	2300	1,75	1
1.4 Paredes de gesso acartonado U = 2,4 W/(m ² ·K) CT = 18,4 kJ/(m ² ·K)	Painel de gesso	1,25	875	0,35	0,84
	Caixa de ar	15	-	-	-
	Painel de gesso	1,25	875	0,35	0,84
^(a) Materiais que não são homogêneos na direção do fluxo de calor e que, por isso, tiveram suas propriedades termofísicas calculadas conforme NBR 15220 (ABNT, 2022).					

Tabela 2: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de coberturas.

Sistema	Descrição do sistema (do exterior para o interior)	e (cm)	ρ (kg/m³)	λ (W/(m·K))	c (kJ/(kg·K))
2.1 Telha de fibrocimento sobre laje sem manta isolante sobre forro de gesso U = 1,4 W/(m ² ·K) CT = 248,3 kJ/(m ² ·K)	Telha de fibrocimento	0,6	1800	0,95	0,84
	Caixa de ar	15	-	-	-
	Laje maciça	10	2300	1,75	1
	Caixa de ar	15	-	-	-
	Forro de gesso	1,25	875	0,35	0,84
2.2 Laje impermeabilizada com manta isolante sobre forro de gesso U = 0,6 W/(m ² ·K) CT = 248,2 kJ/(m ² ·K)	Impermeabilizante	0,5	1000	0,17	1,46
	Laje maciça	10	2300	1,75	1
	Caixa de ar	13	-	-	-
	Lã de vidro	5	50	0,045	0,7
	Forro de gesso	1,25	875	0,35	0,84
2.3 Laje impermeabilizada sem manta isolante sobre forro de gesso U = 1,8 W/(m ² ·K) CT = 246,5 kJ/(m ² ·K)	Impermeabilizante	0,5	1000	0,17	1,46
	Laje maciça	10	2300	1,75	1
	Caixa de ar	15	-	-	-
	Forro de gesso	1,25	875	0,35	0,84
2.4 Telha de fibrocimento sobre laje com manta isolante sobre forro de gesso U = 0,5 W/(m ² ·K) CT = 250 kJ/(m ² ·K)	Telha de fibrocimento	0,6	1800	0,95	0,84
	Caixa de ar	15	-	-	-
	Laje maciça	10	2300	1,75	1
	Caixa de ar	13	-	-	-
	Lã de vidro	5	50	0,045	0,7
	Forro de gesso	1,25	875	0,35	0,84

Tabela 3: Espessura (e), massa específica (ρ), condutividade térmica (λ) e calor específico (c) de cada material componente dos sistemas construtivos e seus valores de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) para os sistemas construtivos de piso.

Sistema	Descrição do sistema (do exterior para o interior)	e (cm)	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m·K))	c (kJ/(kg·K))
3.1 Porcelanato U = 4,8 W/(m ² ·K) CT = 259,9 kJ/(m ² ·K)	Laje sobre solo	10	2300	1,75	1
	Porcelanato	1	2300	0,84	1,30
3.2 Vinílico U = 4,5 W/(m ² ·K) CT = 244,95 kJ/(m ² ·K)	Laje sobre solo	10	2300	1,75	1
	Piso Vinílico	0,5	1300	0,2	2,3
3.3 Laminado U = 4,5 W/(m ² ·K) CT = 240,6375 kJ/(m ² ·K)	Laje sobre solo	10	2300	1,75	1
	Piso Laminado	0,5	925	0,2	2,3
3.4 Taco U = 3,8 W/(m ² ·K) CT = 254,12 kJ/(m ² ·K)	Laje sobre solo	10	2300	1,75	1
	Taco de madeira	2	900	0,29	1,34

As propriedades termofísicas dos demais materiais da edificação foram estabelecidas conforme os dados padrões disponibilizados pelo software Revit (AUTODESK, 2022), retiradas da NBR 15220 (ABNT, 2005) e do Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas (MORISHITA, SORGATO, *et al.*, 2010).

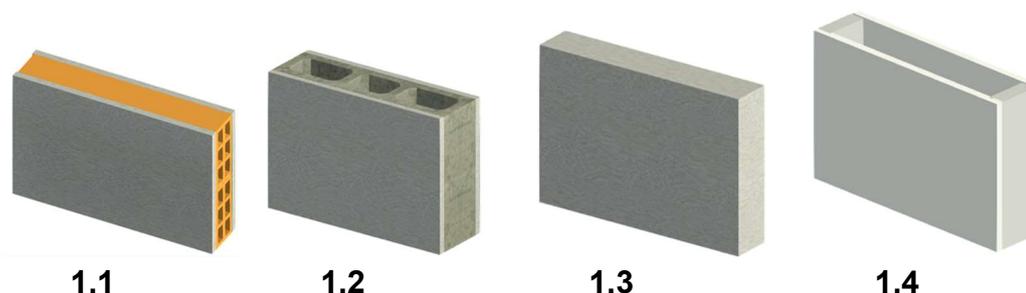


Figura 7: Esquema dos modelos de paredes utilizadas. Fonte: Autor.

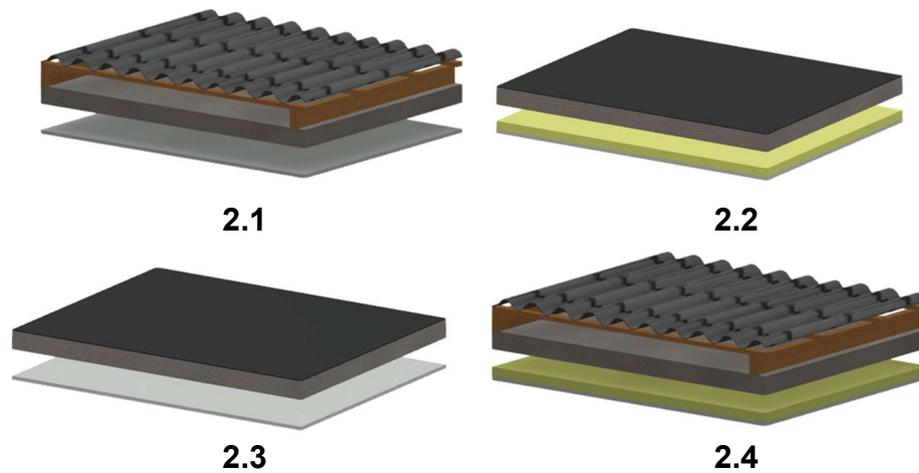


Figura 8: Esquema dos modelos de coberturas utilizadas. Fonte: Autor.



Figura 9: Esquema dos modelos de pisos utilizados. Fonte: Autor.

Para os envidraçados, consideramos sendo de vidro comum de 6 mm, com nenhum artefato pertencente às esquadrias que os sombreassem. Suas dimensões foram decididas conforme modelos comerciais retirados do Site da Leroy Merlin (LEROY MERLIN, 2023). As aberturas das janelas estão detalhadas na Tabela 4. Mais informações sobre a análise de desempenho térmico da edificação encontram-se na seção 3.4. Para a análise de custo, mais informações estão dispostas na seção 3.5.

Tabela 4: Esquadrias especificadas nos modelos.

Dimensões das aberturas (cm)	Localização na residência
<i>Edificação de interesse social adaptada da Vila sustentável (HIS 1)</i>	
Janela: 120 x 100 cm	Salas e quartos e cozinha
Janela: 60 x 60 cm	Banheiro
Portas: 80 x 210 cm	Toda residência
<i>Edificação de interesse social adaptada da Engeplena (HIS 2)</i>	
Janela: 150 x 110 cm	Salas e quartos e cozinha
Janela: 80 x 80 cm	Banheiro
Portas: 70 x 210 cm	Internas e cozinha
Porta: 90 x 210 cm	Principal
<i>Edificação de alto padrão adaptada da Engeplena</i>	
Janela: 200 x 110 cm	Suíte 4, cozinha e área de serviço
Janela: 150 x 110 cm	Escritório
Janela: 300 x 110 cm	Sala
Janela: 80 x 80 cm	Banheiros, closets e dispensa
Porta envidraçada: 200 x 210 cm	Suíte 1, 2 e 3
Porta envidraçada: 250 x 210 cm	Acesso à varanda principal
Portas: 80 x 210 cm	Internas
Porta: 90 x 210 cm	Principal

3.4 Análise de desempenho térmico

A simulação do desempenho térmico da edificação foi realizada no mesmo software Autodesk Revit em sua versão 2021 (AUTODESK, 2022) que reúne e converte os dados para o software EnergyPlus em sua versão 9.1 (ENERGYPLUS, 2022) em que a análise é realizada e os resultados podem ser visualizados em um relatório apresentado no Revit. Após a modelagem das edificações, foram criados “espaços” em todos os ambientes das residências. Estes “espaços” são uma representação geométrica dos ambientes internos, e nos permitem atribuir propriedades como tempo de ocupação, número de pessoas e cargas utilizadas. E então foram definidas suas propriedades, se esse espaço era resfriado e aquecido, tempo de ocupação e iluminação, cargas de ocupação e iluminação, quantidades de pessoas por ambiente e temperaturas de aquecimento e resfriamento, sempre conforme as orientações da NBR 15220 (ABNT, 2022). Após a criação dos espaços, foi definida uma zona térmica separada para cada ambiente fechado da edificação,

esta zona nos permite configurar quais dos espaços estão sujeitos a aclimação mecânica. Conforme as orientações da ANBT 15220 (ABNT, 2022) a configuração de aclimação mecânica se deu somente para as zonas térmicas correspondentes às áreas longa permanência, ou seja, quartos e sala. Ressalta-se que todos os materiais utilizados na modelagem tiveram suas propriedades térmicas devidamente atribuídas (mesmo aqueles que não participaram das variações investigadas).

A análise de desempenho térmico da edificação aconteceu com base na análise de carga térmica que a edificação demanda para ajustar a temperatura interna dentro da faixa operativa estipulada pela NBR 155575 (ABNT, 2021). Considerando o clima da cidade de São Paulo (zona bioclimática 3), a norma prevê que a temperatura operativa da edificação esteja entre 21°C e 23°C (ABNT, 2021). A localização e os dados climáticos tiveram como base a estação meteorológica 838846 do Autodesk *Climate Server*.

Para aclimação dos ambientes de longa permanência, foi considerado, na simulação energética, um sistema de ar-condicionado central e aquecimento por meio de resistência elétrica, os sistemas mais comuns no país. O Revit foi configurado para que, a partir do momento em que a temperatura interior ultrapassasse um desses limites, o sistema mecânico fosse acionado para aquecer ou resfriar o ambiente e, assim, ele medisse a energia (em kWh) gasta para retornar a temperatura interna aos padrões operativos, seja por aquecimento ou resfriamento.

Após terem sido atribuídas todas as informações necessárias, foram então gerados modelos analíticos de energia. A partir destes modelos, foram feitas simulações anuais para determinação da energia necessária para resfriamento e aquecimento de cada edificação. A Figura 10 apresenta o modelo analítico de energia das 3 habitações (com suas zonas térmicas). Para cada combinação de sistemas investigada foi gerado um modelo analítico de energia.

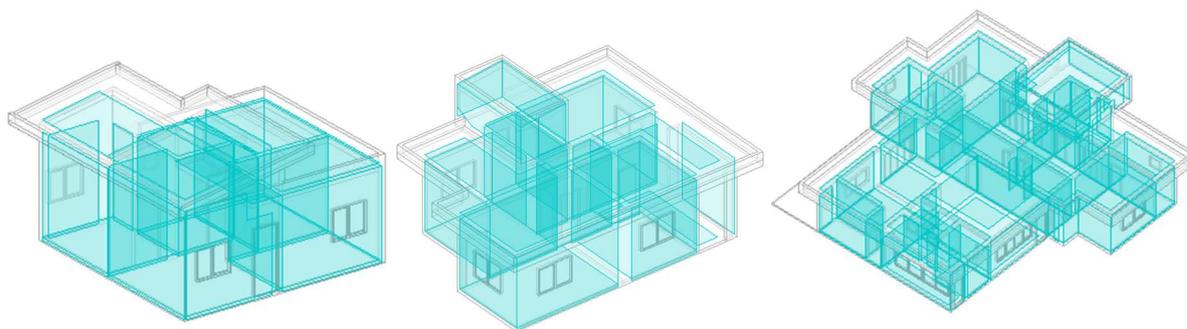


Figura 10: Modelos analíticos de energia. Esquerda: HIS adaptada da Casa Sustentável. Meio: HIS adaptada da Engeplena. Direita: habitação de alto padrão adaptada da Engeplena. Fonte: autor.

Com os resultados obtidos nas simulações, foi levantada a demanda anual de carga térmica de cada modelo (somente para os ambientes de longa permanência, i.e., sala e quartos), a qual foi utilizada para comparação de desempenho térmico entre os modelos com as diferentes combinações de sistemas construtivos. Quanto maior a demanda de carga térmica, menor é o desempenho térmico da residência, já que ela exigiu uma maior utilização de sistema mecânico de aquecimento/resfriamento para manter o ambiente interno dentro da faixa de temperatura operativa. Em outras palavras, uma baixa demanda energética indica uma boa capacidade de isolamento do conjunto de sistemas simulado.

Como a análise deste trabalho centrou-se na demanda de carga térmica da residência, não foi considerada nenhuma ventilação natural na edificação por meio da abertura de janelas. A única entrada de ar presente na edificação foi programada no sistema com a informação de uma taxa de infiltração (através de frestas) no valor de 1 renovação de ar por hora. Além disso, foi considerado a ocupação de 2 pessoas por quarto na residência, com o padrão de ocupação e uso da edificação (iluminação e equipamentos elétricos) em conformidade com a NBR 15575 (ABNT, 2021).

3.5 Análise de custo

O sistema construtivo em paredes de concreto se destaca dentre os demais por se tratar de uma parede estrutural, descartando a necessidade de execução de pilares e vigas nas residências, o que impacta significativamente no custo total da obra. Posto isto, a análise de custo foi feita ponderando essa questão. Ou seja, levamos em conta também a função estrutural da parede de concreto e a necessidade de execução de estrutura em concreto armado para os demais sistemas de parede.

Assim, para estimar o custo desta estrutura (pilares, vigas e fundação), foi elaborado um anteprojeto estrutural também utilizando o Revit para cada uma das edificações analisadas, como são esquematizados na Figura 11. A partir dele foi extraído um volume de concreto necessário para cada edificação. Para estimativa do peso da armação e da área de formas considerou-se uma taxa de aço de 83kg por metro cúbico de concreto e uma taxa de fôrmas de 12m² por metro cúbico de concreto (MATTOS, 2019). Nota: foram inseridas sapatas e vigas baldrame no desenho somente para fins de ilustração – o custo das fundações não foi considerado em nenhum sistema analisado.



Figura 11: Esquemas do anteprojeto estrutural. Esquerda: HIS 1. Meio: HIS 2. Direita: Alto Padrão. Fonte: autor.

Cada quantitativo de material foi cotado segundo seus respectivos custos, de acordo com a tabela SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) e SBC (Stabile SBC Sistemas e Consultoria de Custos). Essas tabelas consistem em um banco de dados onde constam serviços e insumos necessários a cada atividade na construção civil, bem como seus custos. Elas

apresentam cada atividade como uma composição de custos, essa composição tem como base todos serviços e insumos necessários para execução desta atividade. As quantidades necessárias dos serviços e insumos para cada composição são ajustadas de acordo com coeficientes apresentados, os custos unitários referentes a cada serviço ou insumo também são apresentados de acordo com local e data da composição. O custo unitário, por sua vez, é o custo necessário para execução de uma unidade da composição (Ex. 1m² de assentamento de alvenaria). Matematicamente, esse custo será o somatório dos custos unitário dos serviços e insumos presentes na composição multiplicados por seus respectivos coeficientes. Um exemplo das composições utilizadas pode ser visto na Figura 12.

Composição SINAPI - 103332

Código 103332
Descrição ALVENARIA DE VEDAÇÃO DE BLOCOS CERÂMICOS FURADOS NA HORIZONTAL DE 9X14X19 CM (ESPESSURA 9 CM) E ARGAMASSA DE ASSENTAMENTO COM PREPARO EM BETONEIRA. AF_12/2021
Data 11/2022
Estado São Paulo
Tipo PARE - PAREDES/PAINES
Unidade m²
Valor sem Desoneração 113,27
Valor com Desoneração 104,94

	codigo	Descrição	Tipo	Unidade	Valor sem Desoneração	Valor com Desoneração	Coefficiente	Valor sem Desoneração	Valor com Desoneração
C	87292	ARGAMASSA TRAÇO 1:2:8 (EM VOLUME DE CIMENTO, CAL E AREIA MÉDIA ÚMIDA) PARA EMBOÇO/MASSA ÚNICA/ASSENTAMENTO DE ALVENARIA DE VEDAÇÃO, PREPARO MECÂNICO COM BETONEIRA 400 L. AF_08/2019	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	m ³	563,20	550,91	0,0105	5,91	5,78
C	88309	PEDREIRO COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	25,98	23,17	2,2	57,15	50,97
C	88316	SERVEnte COM ENCARGOS COMPLEMENTARES	SEDI - SERVIÇOS DIVERSOS	H	18,74	16,90	1,1	20,61	18,59
I	00007267	BLOCO CERAMICO / TIJOLO VAZADO PARA ALVENARIA DE VEDACAO, 6 FUIROS NA HORIZONTAL, 9 X 14 X 19 CM (L X A X C).	Material	UN	0,72	0,72	37,74	27,17	27,17
I	00034557	TELA DE ACO SOLDADA GALVANIZADA/ZINCADA PARA ALVENARIA, FIO D = *1,20 A 1,70* MM, MALHA 15 X 15 MM, (C X L) *50 X 7,5* CM	Material	M	3,29	3,29	0,58	1,90	1,90
I	00037395	PINO DE ACO COM FUIRO, HASTE = 27 MM (ACAO DIRETA)	Material	CENTO	77,34	77,34	0,0069	0,53	0,53

Figura 12: Composição SINAPI – 103332. Fonte: Orçafascio (ORÇAFASCIO, 2023).

Para este trabalho as tabelas tiveram como data de referência o mês de outubro de 2022. Todos os códigos das composições utilizados neste trabalho estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Composições utilizadas para análise de custo. Fonte: autor.

Descrição	Tabela	Código
Paredes:		
Alvenaria de bloco cerâmico	SINAPI	103356
Argamassa de revestimento	SINAPI	87529
Alvenaria de bloco de concreto	SINAPI	103342
Armação do sistema de paredes de concreto	SINAPI	100067
Concretagem paredes de concreto	SINAPI	99235
Paredes de com placas de gesso acartonado	SINAPI	96361
Coberturas:		
Concretagem lajes	SINAPI	103681
Armação de lajes	SINAPI	92769
Telhamento com telha de fibrocimento	SINAPI	942210
Trama de madeira para telhamento	SINAPI	92543
Impermeabilização de superfície com manta asfáltica	SINAPI	98546
Forro de gesso	SINAPI	96109
Manta térmica de lã de vidro	SBC	70367
Pisos:		
Contrapiso	SINAPI	87765
Revestimento cerâmico tipo porcelanato	SINAPI	87259
Piso vinílico	SINAPI	101727
Piso Laminado	SBC	1700333
Piso em taco de madeira	SINAPI	101751
Estrutura:		
Concretagem pilares	SINAPI	103672
Forma dos pilares	SINAPI	92264
Armadura dos pilares e vigas	SINAPI	104109
Concretagem das vigas	SINAPI	103675
Formas das vigas	SINAPI	92266

Foram, então, desenvolvidas tabelas que nos permitissem visualizar os quantitativos de cada envoltória analisada, assim como o preço final para cada conjunto de sistema utilizado. O custo da estrutura em concreto armado foi encontrado separadamente, e somado ao custo das envoltórias quando necessário. Os custos das demais instalações e sistemas da edificação não foram considerados. A

Tabela 6 apresenta quantitativos obtidos para três edificações. A Figura 13 demonstra um exemplo dessas tabelas emitidas pelo próprio software de modelagem BIM. Os quantitativos apresentaram ligeira variação devido a diferentes espessuras dos sistemas construtivos das paredes.

Tabela 6: Quantitativos das envoltórias para cada edificação. Fonte: autor.

Edificação	Envoltória	Quantidade
HIS 1	Paredes	146 m ²
	Laje e cobertura	57 m ²
	Forro	39 m ²
	Piso interno	28 m ²
	Piso das áreas molhadas	11 m ²
HIS 2	Paredes	186 m ²
	Laje e cobertura	89 m ²
	Forro	52 m ²
	Piso interno	39 m ²
	Piso das áreas molhadas	22 m ²
Alto padrão	Paredes	490 m ²
	Laje e cobertura	172 m ²
	Forro	247 m ²
	Piso interno	124 m ²
	Piso das áreas molhadas	96 m ²

<Levantamento de material>			
A	B	C	D
Material	Área	Custo (R\$)	Valor total (R\$)
Cobertura			
Forro 2.1/2.3			
Ar	51.47 m ²	0.00	0.00
Forro de gesso	51.47 m ²	42.45	2184.71
Laje 2.1/2.4			
Ar	89.36 m ²	0.00	0.00
Laje de concreto	89.36 m ²	194.97	17422.65
Telha de fibrocimento	89.36 m ²	77.32	6909.30
Paredes			
Parede 1.1			
Alvenaria de tijolo cerâmico	186.27 m ²	104.94	19546.99
Argamassa de revestimento	372.54 m ²	35.88	13366.61
Pisos			
Piso 3.1			
Contrapiso	60.23 m ²	53.83	3242.22
Porcelanato	60.23 m ²	142.09	8558.18
Total : 82	1050.28 m²		71230.67

Figura 13: Exemplo de tabela orçamentária disponibilizada pelo Revit para a HIS 2. Fonte: autor.

3.6 Tratamento dos resultados e Comparativo das Análises

Finalizando-se as fases de análise de desempenho térmico e de custo de cada modelo, os resultados foram contrapostos para uma comparação. Transferindo os resultados das 64 combinações possíveis de sistemas construtivos para uma única planilha em Excel, realizamos análises sobre a identificação dos modelos, como, por exemplo, a combinação que garantiu:

- Melhor desempenho térmico;
- Pior desempenho térmico;
- Menor investimento;
- Maior investimento;
- Melhor custo-benefício (resultado ótimo comparando-se investimento e desempenho).

Para a análise de custo-benefício, plotamos um gráfico de dispersão com os valores de desempenho térmico e de custo. Isso foi feito a fim de buscar identificar um modelo que representasse um ponto ótimo, que aliasse um bom desempenho térmico à edificação com um baixo custo de implementação.

4 RESULTADOS

4.1 Comportamento geral dos sistemas construtivos

Os resultados das análises térmicas e orçamentárias são apresentados através do gráfico de vela presente na Figura 14. Os resultados de cada edificação estão apresentados separadamente na seguinte ordem: HIS adaptada da Vila Sustentável (HIS1), HIS adaptada da Engeplena (HIS 2) e edificação alto padrão. Em cada gráfico estão apresentados os 128 resultados correspondentes a todas as combinações para cada residência (64 combinações de propriedades x 2 parâmetros – custo e desempenho). Cada gráfico apresenta um filtro em seu eixo “x”, o que nos permite refinar pelos resultados de cada sistema construtivo analisado em cada envoltória (na seguinte ordem: envoltória vertical, envoltória horizontal superior e envoltória horizontal inferior). Os eixos y de cada gráfico correspondem à demanda energética necessária para manutenção da temperatura interna das edificações.

Para análise térmica, devemos observar o formato do gráfico de velas onde o corpo do gráfico representa o intervalo que a maior parte dos resultados se encontram, suas extremidades representam os valores máximos e mínimos do conjunto de dados. A linha que divide o corpo se trata da mediana. O símbolo “x” apresentado é a média do conjunto de dados analisado. Nota: quanto menor a demanda energética necessária, melhor será o desempenho térmico do conjunto de sistemas simulado.

As cores apresentadas nos gráficos dizem respeito ao custo de cada sistema. A legenda com a escala de cor traduzida em custo unitário consta na parte inferior da Figura 14. Para análises energéticas, deve-se considerar as cores dos gráficos de velas, sendo envoltórias representadas na cor azul possuem um menor custo e as amarelas um maior custo. Além disso, sob o eixo no qual são dispostas as envoltórias, podemos observar o valor das mesmas (em R\$/m²) e a porcentagem correspondente de cada uma sobre a que apresenta menor custo de execução. Neste gráfico as paredes foram consideradas apenas como fechamento para a análise orçamentária. Já na Figura 15 são consolidados os custos do sistema construtivo de parede e do sistema estrutural (pilares e vigas) para as paredes que não são estruturais, i.e., todas as analisadas neste trabalho exceto a parede de concreto.

Lembrando, os sistemas são os seguintes:

Sistemas de vedação vertical:

- 1.1 – Blocos cerâmicos 9cm + Argamassa;
- 1.2 – Blocos de concreto 14cm + Argamassa;
- 1.3 – Paredes de concreto;
- 1.4 – Paredes de gesso acartonado (sem isolamento interno);

Sistemas de Cobertura:

- 2.1 – Telha de fibrocimento sobre laje sem manta isolante sobre forro de gesso;
- 2.2 – Laje impermeabilizada com manta isolante sobre forro de gesso;
- 2.3 – Laje impermeabilizada sem manta isolante sobre forro de gesso;
- 2.4 – Telha de fibrocimento sobre laje com manta isolante sobre forro de gesso;

Sistemas de piso:

- 3.1 – Porcelanato;
- 3.2 – Vinílico;
- 3.3 – Laminado;
- 3.4 – Taco.

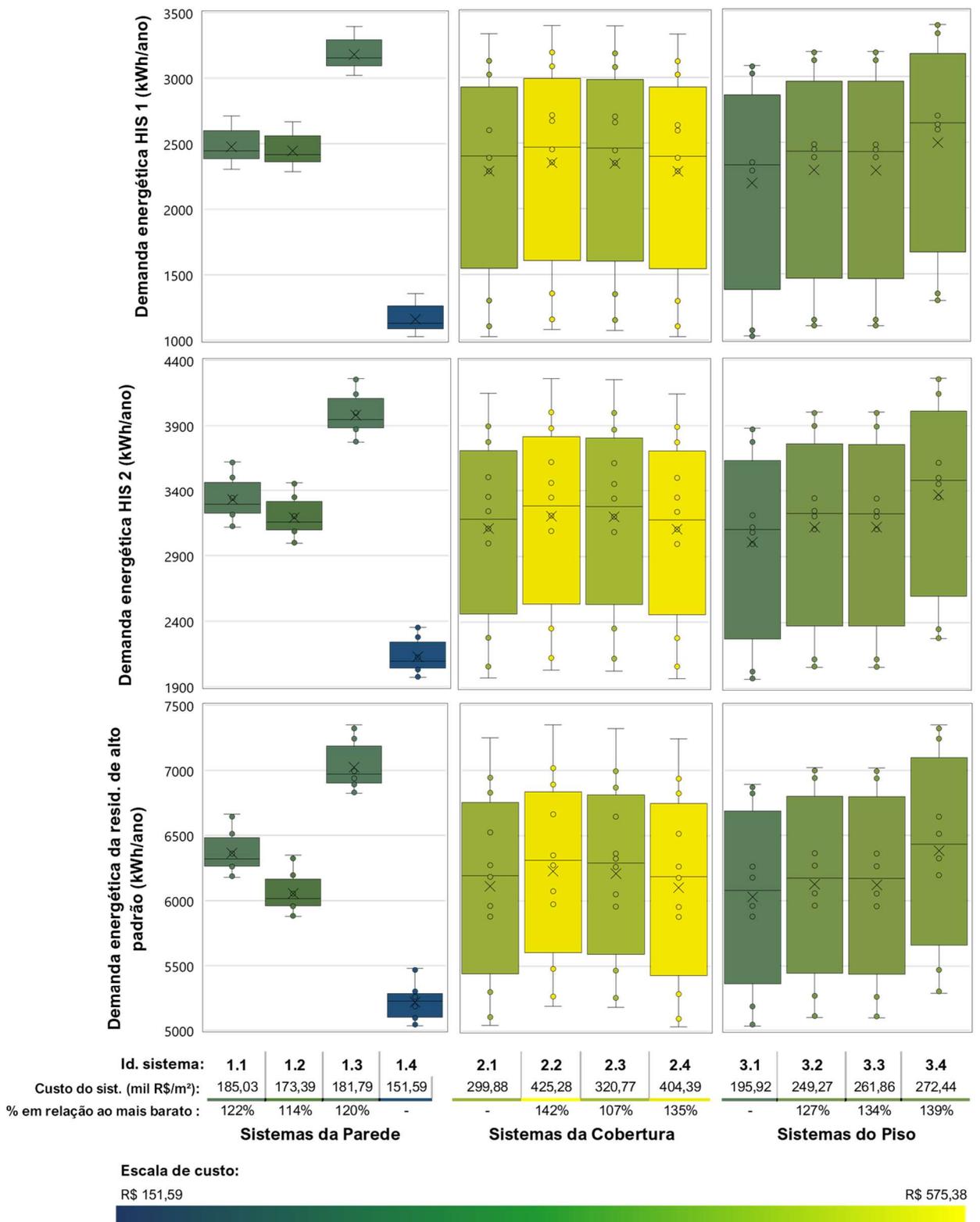
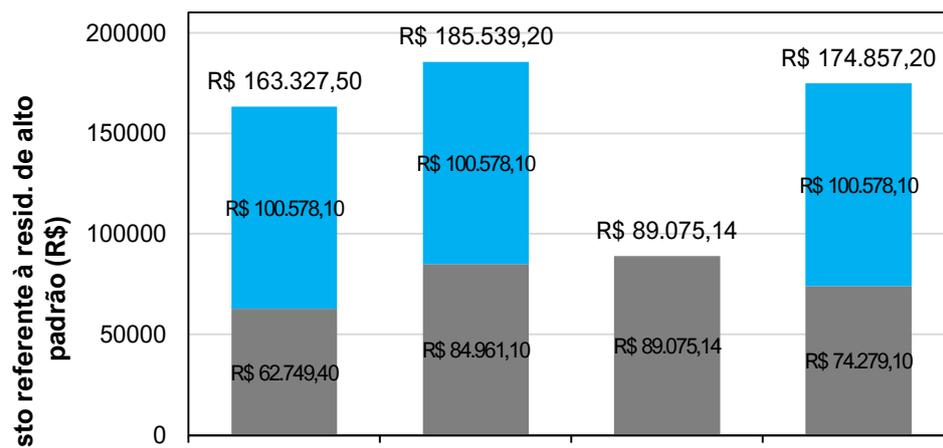
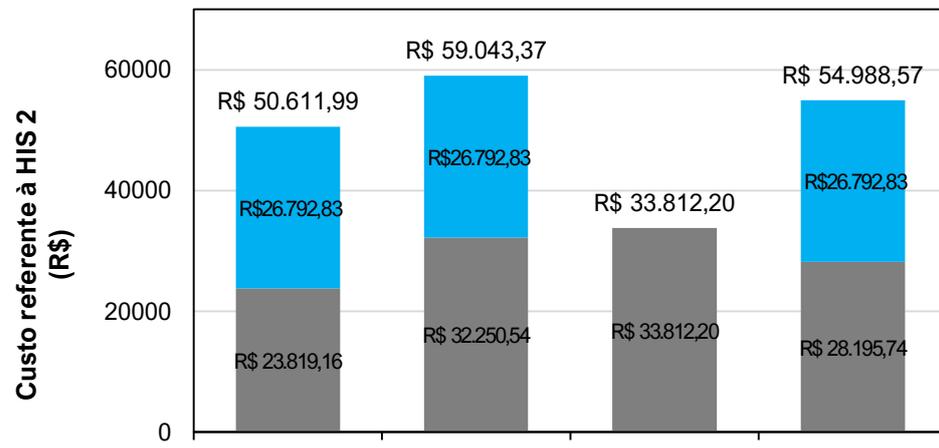
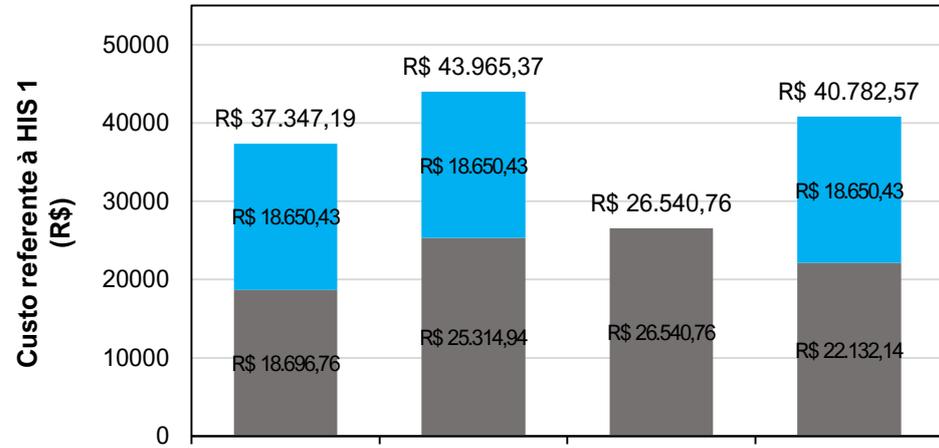


Figura 14: Demanda energética da edificação propiciada pelas combinações dos sistemas construtivos, de acordo com as variações de cada um desses sistemas (seus custos são identificados por cor). Fonte: autor.



■ Sistema de parede ■ Sistema estrutural (pilares e vigas)

Figura 15: Comparação do custo dos sistemas de parede e do sistema estrutural. Fonte: Autor.

A Figura 14 demonstra comportamentos semelhantes dos sistemas construtivos, sob a ótica do tipo e tamanho da edificação, variando, apenas, a ordem de grandeza dos valores. Percebemos a residência de alto padrão consumindo mais energia, o que se relaciona com a maior área de espaços climatizados, sendo essa de 115 m². Da mesma forma, a HIS 1, que possui menor área climatizada, 28 m², consumiu menos energia.

As paredes se apresentaram como a melhor estratégia para melhorar o desempenho térmico da edificação e tendo o menor custo, quando dissociadas da necessidade de construção do sistema estrutural das residências. Percebemos os elementos verticais ditando o desempenho térmico da edificação, pois as paredes são relativamente menores nos gráficos dos sistemas de paredes, o que representa uma maior concentração dos resultados em uma menor faixa de valor de demanda energética. O piso e a cobertura tiveram menor significância ao analisarmos o desempenho térmico das edificações, uma vez que as paredes referentes a esses sistemas são extensas, ou seja, apresentam grande variação entre os resultados de carga térmica, indicando baixo peso nos resultados de eficiência energética das edificações.

Nesse sentido, as análises feitas considerando as residências com parede de gesso acartonado (sistema 1.4) foram as que obtiveram maior eficiência energética a um menor custo de implementação (R\$151,59/m²), desconsiderando o sistema estrutural. Considerando a necessidade do sistema estrutural, esse sistema apresentou o segundo menor custo para as três edificações, como se observa na Figura 15. O consumo médio das combinações que utilizaram esse sistema para as residências HIS 1 foi de 1159,75 kWh/ano. Para a residência HIS 2, esse consumo foi de 2126,19 kWh/ano. Já a residência de alto padrão obteve um consumo médio de 5215 kWh/ano.

Além disso, percebemos que as edificações com o sistema construtivo 1.3 (paredes de concreto) foram as que obtiveram piores resultados de eficiência energética. Houve um alto consumo médio das combinações deste sistema para as

residências da HIS 1 (3180,63 kWh/ano), HIS 2 (3980,94 kWh/ano) e a de alto padrão (7023kWh/ano). Em média, esses valores ficaram 20% superiores que o sistema de paredes mais barato (1.4 – Gesso Acartonado). Contudo, observando a Figura 15, percebemos que a parede de concreto, por ser um sistema estrutural, evita a necessidade de pilares e vigas, o que faz esse sistema ser o mais barato em uma análise global diante das 3 outras estratégias analisadas para as paredes das residências. Considerando a necessidade de vigas e pilares nos demais sistemas de paredes, notamos uma diferença de R\$ 19.124,05, entre a parede de concreto e sistema mais caro (sistema 1.1 – alvenaria em blocos cerâmicos), e uma diferença de R\$ 14.241,81, entre a parede de concreto e o sistema com melhor desempenho térmico (1.4 – gesso acartonado), para a HIS 1. Em relação à HIS 2, essas diferenças aumentam R\$ 27.396,21 comparando com o sistema 1.1 e R\$ 21.176,37 em relação ao sistema 1.4. Quanto à residência de alto padrão, essas diferenças são ainda maiores, sendo de R\$ 102.167,7, entre 1.3 e 1.1, e R\$ 85.776,06 entre 1.3 e 1.4. Dessa forma, percebemos que a parede de concreto é mais vantajosa financeiramente, por ser um sistema estrutural.

Por sua vez, as edificações com paredes de blocos de concreto(sistema 1.1) apresentaram desempenho térmico um pouco superior em relação dos blocos de concreto (sistema 1.2), sendo ambos resultados intermediários. Essa vantagem do sistema de blocos de concreto (1.2) foi maior conforme se aumentou a área climatizada da edificação. Enquanto na HIS 1 (28 m² de área climatizada), suas velas apresentam resultados significativamente próximos (30,75 kWh/ano de diferença entre os 1.1 e 1.2), na residência de alto padrão (115 m² de área climatizada), as velas se afastam significativamente (968,31 kWh/ano entre as médias dos dois sistemas). Logo, em edificações que o uso da alvenaria é inevitável, especialmente aquelas com maior área, o sistema de blocos de concreto torna-se mais eficaz que o sistema de blocos de cerâmicos, tanto em termos energéticos quanto em custos de implantação na construção.

Os resultados de carga térmica referentes aos sistemas de cobertura aparentam ter pouca variação entre em si. Em todas as edificações, o melhor sistema para a eficiência energética foi o de telha de fibrocimento sobre laje com lã de vidro sobre

forro (sistema 2.4). Por sua vez, o pior sistema foi de laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (sistema 2.2). Na residência da HIS 1, por exemplo, o sistema 2.2 fez a edificação demandar uma energia média de 2211,48 kWh/ano, enquanto o sistema 2.4 fez a casa demandar uma energia média de 2150,2 kWh/ano. Essa diferença resulta em apenas 61,28 kWh/ano. Na HIS 2 essa diferença foi de 98,56 kWh/ano. Já na residência de alto padrão, a diferença resulta em 124,81 kWh/ano.

A variação dos sistemas de cobertura (entre a pior e melhor soluções) resulta em uma economia máxima de R\$ 40,44 para a HIS 1, R\$ 65,05 para a HIS 2 e R\$ 82,38 para a residência de alto padrão no gasto anual de energia, segundo valores da tarifa para um consumidor residencial da empresa ENEL em São Paulo em 2023 (ENEL, 2023). Por outro lado, ressalta-se a grande diferença entre os custos iniciais de aquisição e instalação de cada sistema. O sistema 2.2 (laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro), que é o mais caro (R\$ 425,28/m²), custa 42% a mais do que o sistema 2.1 (telhas de fibrocimento sobre laje sem lã de vidro sobre forro), que é o mais barato dentre os estudados (R\$ 299,88/m²). Já em relação ao sistema mais vantajoso do ponto de vista do desempenho térmico, o 2.4 (telhas de fibrocimento sobre laje com lã de vidro sobre forro) (R\$ 404,39/m²) custa 35% a mais do que o mais barato (2.1 - telhas de fibrocimento sem lã de vidro).

Os sistemas construtivos do piso apresentaram um custo mediano em relação aos demais sistemas da parede (desconsiderando pilares e vigas) e da cobertura. Nas análises de eficiência energética, o sistema 3.1 (piso cerâmico) apresentou os melhores resultados médios em todas edificações, sendo também o sistema mais barato (R\$ 195,00/m²). Esse sistema apresentou médias de demanda energética na residência da HIS de 2061,59 kWh/ano, na HIS 2 de 3009,88 kWh/ano, e na residência de alto padrão de 6028,75 kWh/ano. Os sistemas 3.2 (piso vinílico) e 3.3 (piso laminado) tiveram comportamentos praticamente idênticos, apresentando diferenças médias de demanda energética abaixo de 4,2 kWh/ano para todas as residências. Também se notou pouca diferença em relação aos custos os sistemas 3.2 - piso vinílico (R\$ 249,27/m²) e 3.3 – piso laminado (R\$ 261,86/m²), cerca de 5%. Já o piso de taco (sistema 3.4) apresentou o pior resultado na análise de desempenho térmico de todas as edificações, além de ser o sistema com custo mais elevado (R\$

272,44/m²). Ele é 39% mais caro ao comparamos com sistema com piso cerâmico (3.1), que é o mais barato. As médias de desempenho térmico do sistema 3.4 foi de 2350,2 kWh/ano para a HIS 1, 3371 kWh/ano para a HIS 2 e 6381,81 kWh/ano para a residência de alto padrão.

4.2 Análises de demanda energética que as combinações propiciam às edificações

A demanda energética de cada edificação inclui a somatória da energia necessária para resfriamento e aquecimento. Esses valores podem ser observados detalhadamente na Figura 16. Em todas as análises, notamos a quantidade de energia para resfriamento sendo superior àquela para aquecimento.

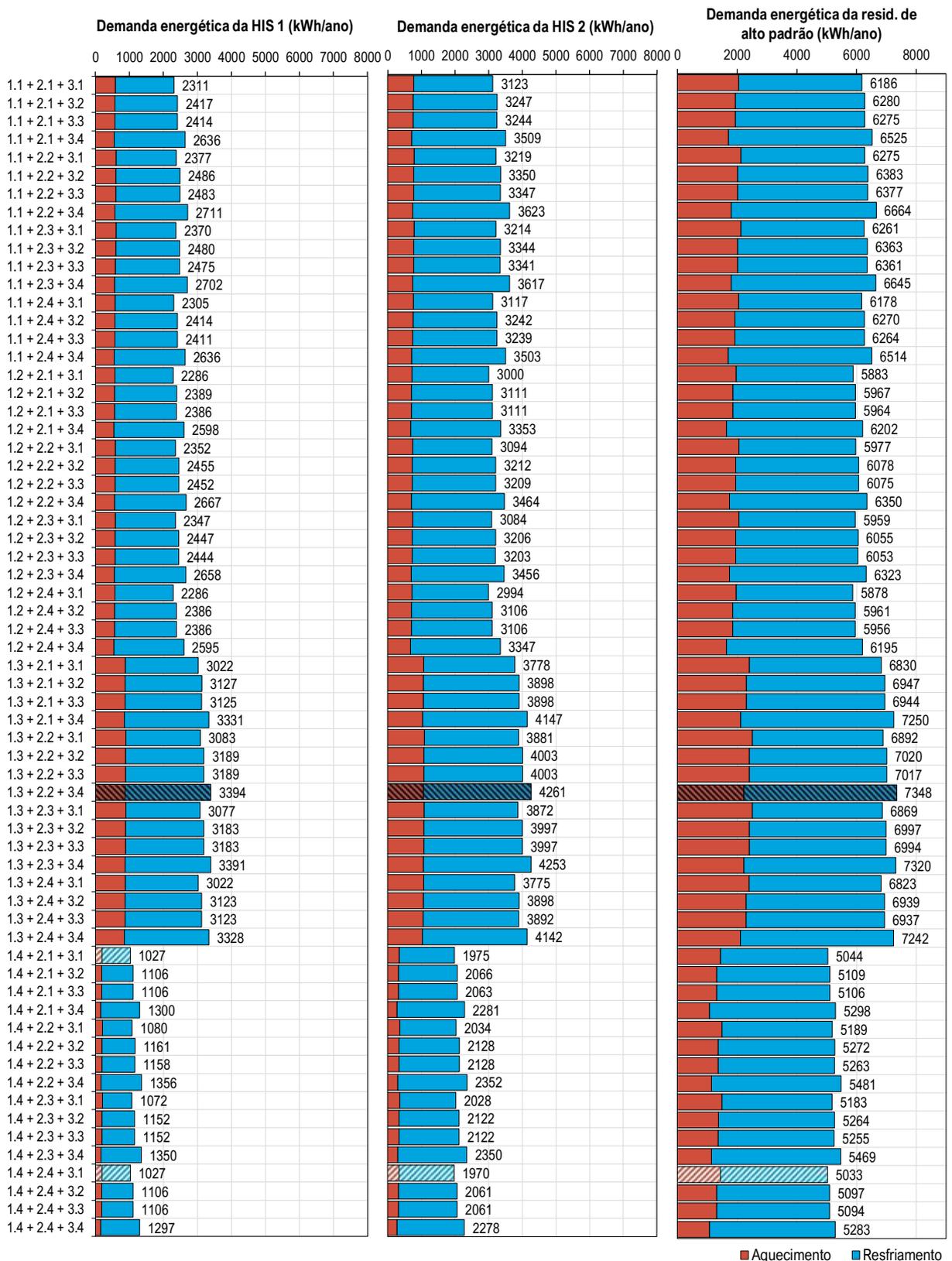


Figura 16: Demanda energética de aquecimento e resfriamento para cada combinação das três edificações. As colunas hachuradas mostram o pior e melhor casos. Fonte: Autor.

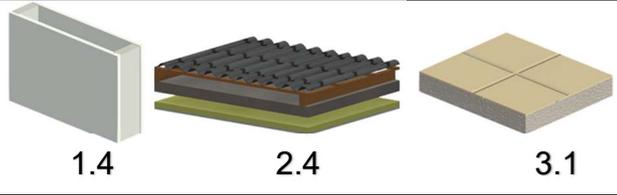
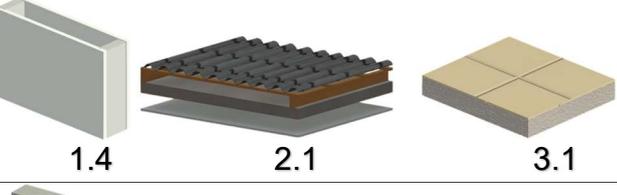
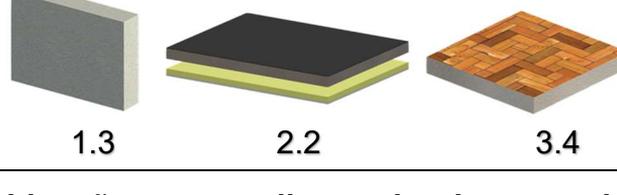
	Edificação	Combinação (desenho esquemático)
Melhor Desempenho	HIS 1 HIS 2 Alto Padrão	
	HIS 1	
Pior Desempenho	HIS 1 HIS 2 Alto Padrão	

Tabela 7: Resumo das combinações com melhor e pior desempenho.

Ao analisarmos os valores de transmitância e capacitância térmicas de todos os sistemas construtivos considerados neste trabalho (Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3) percebe-se que somente as paredes apresentaram grandes diferenças entres os sistemas considerados. No caso das envoltórias horizontais (piso e cobertura), os valores de transmitância e capacitância foram próximos, corroborando para o fato de que essas envoltórias tiveram resultados mais próximos de demanda energética comparadas aos elementos verticais das edificações.

A combinação que garantiu o melhor desempenho térmico à edificação foi a mesma, independentemente das residências. Trata-se de uma combinação que envolvem os sistemas construtivos com parede de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento com manta de fibra de vidro sobre o forro (2.4) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.4+3.1). Porém, na HIS 1, houve outra combinação que obteve o mesmo resultado de demanda energética: parede de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.1+3.1). O resultado da demanda energética para a residência da HIS 1 foi de 1027 kWh/ano em

ambas as combinações que corresponde a um custo anual de energia de R\$ 667,82. Para a residência de HIS 2, a demanda foi de 1970 kWh/ano, o que corresponde a R\$ 1300,20. Quanto à residência de alto padrão, foi demandado 5033 kWh/ano, o que significa um gasto anual de R\$ 3321,78 para aclimatação.

A envoltória vertical em paredes de painel de gesso acartonado (sistema 1.4) possui o menor valor de transmitância térmica ($2,4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) em comparação com os demais sistemas. Isso significa que a envoltória transmite calor de uma superfície a outra com mais dificuldade, atuando como isolante (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014). Podemos entender que esse sistema potencializou a capacidade da edificação em reduzir os custos com o sistema de climatização mecânica, uma vez que, atuando como isolante, a temperatura externa terá menor influência no ambiente interior. A capacidade térmica desse sistema, mesmo sendo relativamente baixa ($18,4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$), não se mostrou tão influente para os sistemas de parede. Apesar de sabermos que, quanto maior a capacidade térmica dos elementos da edificação, maior estabilidade no perfil de temperatura interna (menor amplitude térmica interna) (LAMBERTS, DUTRA e PEREIRA, 2014), a redução da transmitância térmica se mostrou mais influente no resultado do desempenho térmico da vedação vertical.

A cobertura de telha de fibrocimento com utilização de lã de vidro (sistema 2.4) apresentou o menor valor de transmitância térmica ($0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Isso significa que é a envoltória que transmite calor de uma superfície a outra com mais dificuldade, ou seja, a envoltória que possui maiores propriedades isolantes. O sistema 2.4 também possui a maior capacidade térmica ($250 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) – ou potencial de armazenamento de energia.

Já piso com porcelanato apresentou maior valor de transmitância ($4,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) e maior valor de capacidade térmica ($259,9 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$). Podemos entender que a maior transmitância térmica permite uma maior troca de calor com o solo, que na simulação é mantido a uma temperatura constante de 18°C , o que pode auxiliar no resfriamento passivo da edificação.

Em todas as edificações analisadas, a combinação que obteve pior resultado nas análises de eficiência energética foi de paredes de concreto (1.3) com cobertura de laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (2.2) e com piso de taco de madeira

(3.4) (combinação 1.3+2.2+3.4). O resultado da demanda energética para HIS 1 foi de 3394 kWh/ano (equivalente a um custo anual de R\$ 2240,04), para HIS 2 foi de 4261 kWh/ano (R\$ 2812,26) e residência de alto padrão de 7348 kWh/ano (R\$ 4849,68).

O sistema de parede de concreto (sistema 1.3) é o que possui maior valor de transmitância térmica ($4,4 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) e maior valor de capacidade térmica ($230 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) dentre todas as analisadas. Como já percebido, a capacidade térmica não foi significativa para a análise dos sistemas da parede. Mas a alta transmitância térmica do sistema 1.3 (paredes de concreto) significa que se trata de uma envoltória que transmite calor de uma superfície a outra com mais facilidade, demandando mais energia para fazer a edificação se resfriar (em dias de altas temperaturas) ou se aquecer (em dias de baixas temperaturas)

Já a cobertura com laje impermeabilizada utilizando lâ de vidro sobre o forro (sistema 2.2) apresentou valores intermediários de transmitância térmica ($0,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) e capacidade térmica ($248,2 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$). É válido ressaltar que os resultados das análises desta combinação foram muito próximos das combinações que utilizaram da cobertura laje impermeabilizada sem lâ de vidro sobre forro (2.3), que apresentou menor valor de capacidade térmica ($246,5 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$) e maior valor de transmitância térmica ($1,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$).

Em relação ao piso com taco (sistema 3.4), esse foi o que apresentou menor valor de transmitância térmica ($3,8 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$). Logo, dentre as opções, é a combinação que possui mais dificuldade em transmitir calor entre as superfícies. Como o solo é um elemento importante para auxiliar no resfriamento passivo da edificação (já que sua temperatura varia pouco em relação ao ambiente externo), um grande isolamento em relação ao solo foi prejudicial ao desempenho térmico. O piso com tacos (3.4) apresentou um valor intermediário de capacidade térmica ($254,12 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$).

Além disso, a localização considerada nas análises (cidade de São Paulo/SP) corresponde à zona bioclimática 3. De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2022), as diretrizes construtivas de vedações externas para essa zona consistem em paredes leves refletoras e cobertura leve isolada. A norma define paredes leves refletoras devem possuir transmitância térmica menor ou igual a $3,6 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$. A parede de gesso utilizada na análise de melhor resultado (sistema 1.4), além das paredes de bloco

cerâmico (sistema 1.1) e blocos de concreto (sistema 1.2), estão dentro do intervalo definido pela norma, deixando de fora somente a parede de concreto que possui transmitância térmica igual a $4,4 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (coerentemente tendo obtido o pior resultado neste trabalho).

Já quanto à cobertura, a NBR 15220 (ABNT, 2022) também prescreve para essa zona bioclimática o uso de coberturas leves isoladas possuindo transmitância térmica menor ou igual a $2,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Todas as coberturas analisadas neste trabalho estão de acordo com diretrizes estabelecidas. Por sua vez, a norma não diz respeito sobre transmitância térmica do piso, apesar de notarmos mais influência do sistema de piso do que do sistema de cobertura neste trabalho, para os sistemas analisados (Figura 14).

Assim, podemos dizer que a NBR 15220 (ABNT, 2022) faz uma larga tolerância por parte dos sistemas construtivos das edificações, uma vez que a maior parte dos sistemas utilizados atendem aos requisitos, embora tenham obtido um desempenho significativamente diferente. Em termos de gasto anual com energia, estamos falando de uma diferença média de cerca de R\$ 1500,00 anuais entre a melhor e a pior combinação de sistema analisada (similar para as três edificações). Ao considerarmos o salário-mínimo anual brasileiro de R\$ 1212,00 em 2022, esse valor é corresponde a 10% do gasto anual de uma família com uma única fonte de renda.

Quando se considera somente as combinações permitidas pela norma (– aqui trocando-se a parede de concreto pelo 2º pior sistema de parede – o de blocos de alvenaria cerâmicos), a diferença entre a melhor (1.4+2.4+3.1) e a pior combinação (1.1+2.2+3.4) é de cerca de R\$ 1100,00 anuais, em uma média para as três edificações. Tendo em mente que todos esses valores de combinações estão de acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2022), verificamos a importância das simulações computacionais na análise mais detalhada de desempenho térmico da edificação. Elas são necessárias para tomadas de decisão mais eficazes quanto às estratégias construtivas a serem empregadas na edificação.

4.3 Análise orçamentária da implementação dos sistemas construtivos na edificação.

Na Figura 17, é possível observar os resultados das análises orçamentárias (na etapa de construção) para cada edificação, considerando os sistemas de piso, parede e cobertura simulados. Foi considerada também a estrutura em concreto armado para as combinações na qual essa é necessária (combinações que possuem paredes de blocos cerâmicos, blocos de concreto ou gesso acartonado). As envoltórias foram analisadas considerando um custo por área, que inclui aquisição de materiais e procedimento de instalação. Já para a estrutura, considerou-se um preço fixo para sua execução, que é de R\$ 18.650,43 para a HIS 1, R\$ 26.792,83 para a HIS 2 e R\$ 100.578,10 para residência de alto padrão, como pôde ser verificado na Figura 15. Este preço levou em consideração a aquisição de material e procedimentos de execução de toda a superestrutura para cada tipo de edificação mostradas na Figura 11. Os custos das esquadrias e das demais instalações não foram considerados, admitindo que esses seriam iguais em cada combinação adotada nas edificações. Sabe-se que cada sistema possui especificidades, como necessidade de vergas e contravergas ou a necessidade de quebra de blocos para execução dos sistemas de instalações prediais em sistemas de alvenarias, o que impacta diretamente no custo final do empreendimento; porém, no presente trabalho, para fins de simplificação de modelagem, essas particularidades não foram consideradas.

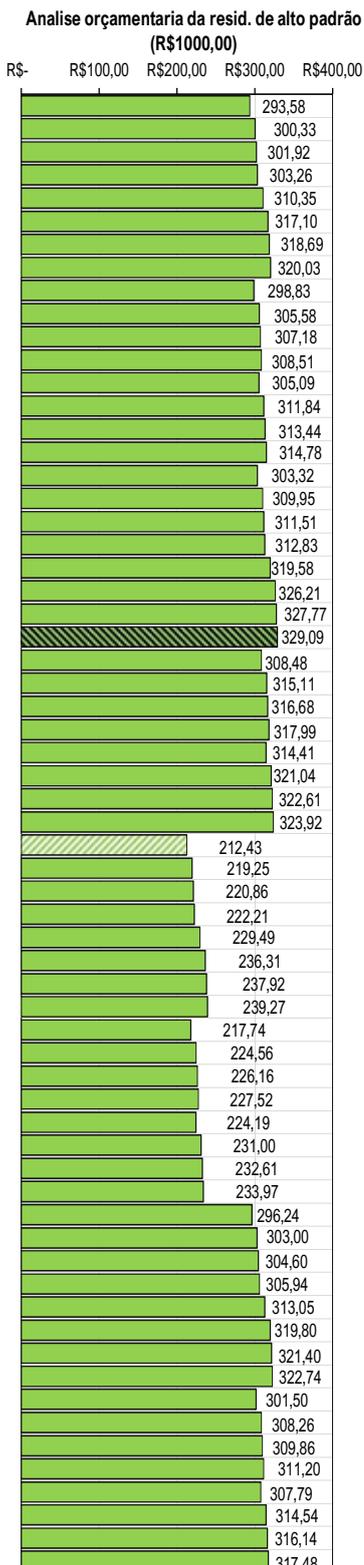
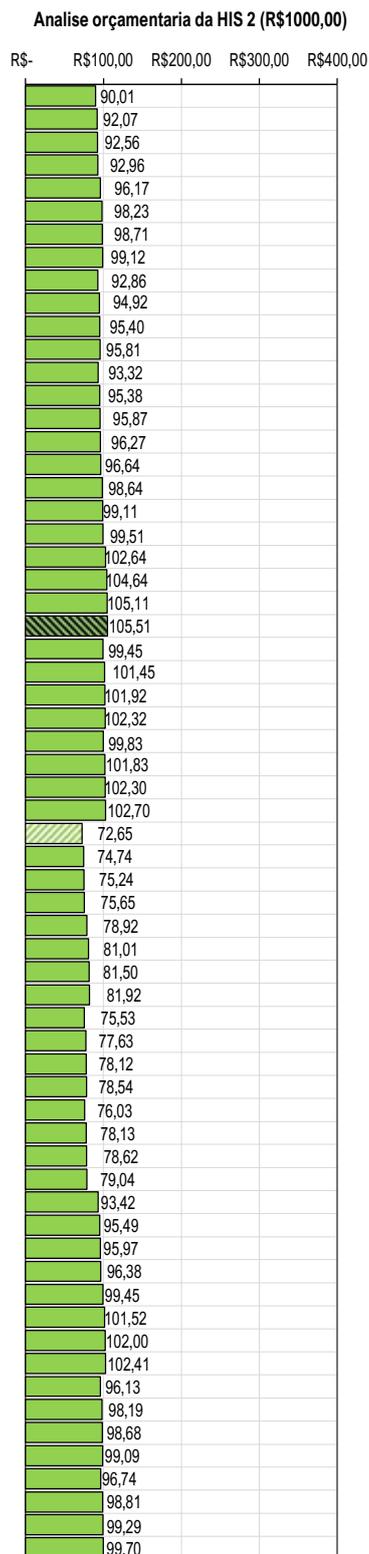
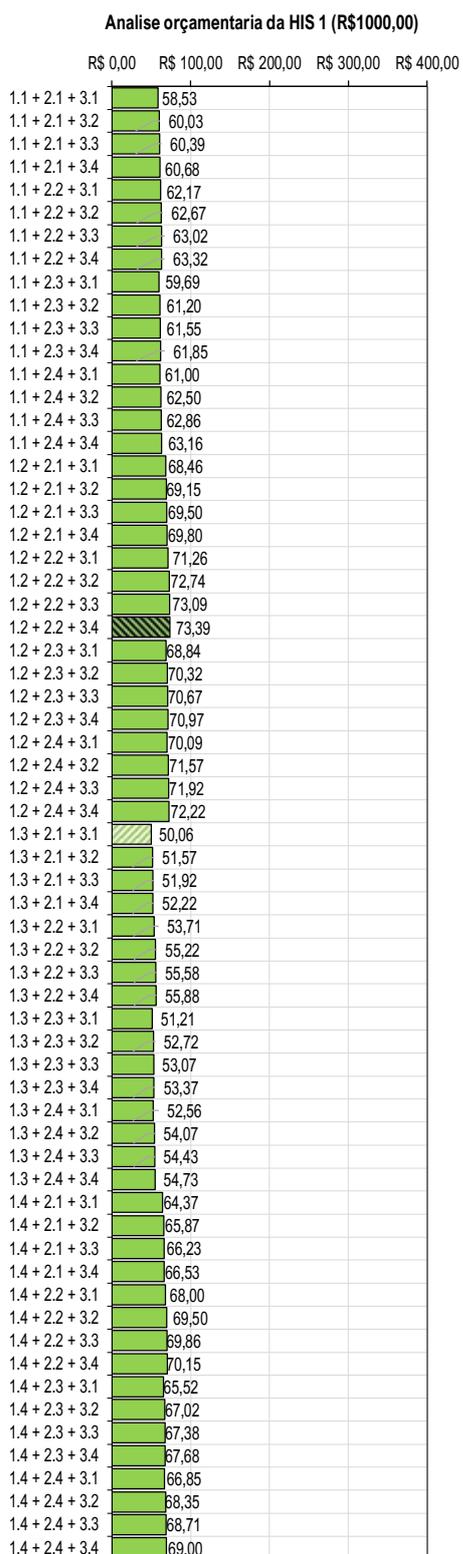


Figura 17: Análise orçamentária das três edificações levando em conta necessidade do elemento estrutural (em milhares de reais). As colunas hachuradas mostram o pior e melhor casos. Fonte: Autor.

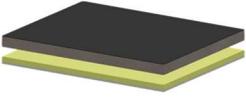
	Edificação	Combinação (desenho esquemático)
Menor custo	HIS 1 HIS 2 Alto Padrão	   1.4 2.1 3.1
Maior custo	HIS 1 HIS 2 Alto Padrão	   1.2 2.2 3.4

Tabela 8: Resumo das combinações com maior e menor custo.

A necessidade de se utilizar um elemento estrutural para combinações que possuem paredes de bloco cerâmico, blocos de concreto ou gesso acartonado resulta em um acréscimo de custo considerável. As combinações que utilizam de paredes de concreto apresentaram os menores custos.

Em todas as edificações, a combinação de paredes de concreto (1.3) com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e porcelanato como piso (3.1) (conjunto 1.3+2.1+3.1) foram os que apresentaram menor custo - R\$ 50.055,47 na HIS 1, R\$ 72.651,48 na HIS 2 e R\$ 212.431,33 na residência de alto padrão. Já a combinação de paredes de blocos de concreto (1.2) com cobertura laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (2.2) e piso de taco de madeira (3.4) (conjunto 1.2+2.2+3.4) apresentou custo mais elevado em todas as residências - R\$ 73.385,54 na HIS 1, R\$ 105.511,54 na HIS 2 e R\$ 329.088,03 na residência de alto padrão. A diferença dos valores entre a combinação mais cara e mais barata resulta em R\$ 23.330,07 na HIS 1, R\$ 32.860,06 na HIS 2 e R\$ 116.656,7 na residência de alto padrão.

O conjunto com o melhor desempenho térmico, de paredes de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento com manta de fibra de vidro sobre o forro (2.4) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.4+3.1) custou R\$ 66.847,59

para a HIS 1, R\$ 96.743,13 para a HIS 2 e R\$ 307.785,42 na residência de alto padrão. O conjunto de paredes de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.4+3.1) que obteve mesmo resultado que a combinação (1.4+2.4+3.1) para a HIS1 custou R\$ 64.370,60, sendo assim mais barato. Com isso, a diferença do sistema com melhor desempenho térmico em relação ao conjunto de sistemas mais barato (1.3+2.1+3.1), fica em R\$ 14.315,13 para a HIS 1, R\$ 24.091,65 para a HIS 2 e R\$ 95.354,09 na residência de alto padrão.

Entretanto, verificando-se o CUB¹ (Custo Unitário Básico da Construção do Sindicato da Indústria da Construção Civil de Minas Gerais) de outubro de 2022, tem-se o custo médio por m² para uma edificação de padrão social como R\$ 2109,52 e de padrão alto, R\$ 3151,57. Multiplicando-se o valor do CUB pela área de cada residência, a opção conjunto de melhor desempenho térmico em relação ao mais barato aumentaria os custos totais da superestrutura da edificação em 15,42% para a HIS 1, 17,05% para a HIS 2 e 12,45% para a residência de alto padrão.

4.4 Pior e melhor combinação construtiva a partir de uma análise conjunta de melhorias energética e orçamentaria.

Os gráficos apresentados na Figura 18, Figura 19 e Figura 20 correspondem a análise conjunta de custo e eficiência energética da residência HIS 1, HIS 2 e residência de alto padrão, respectivamente. Em todos os gráficos é possível distinguir três agrupamentos distintos de pontos. Esses agrupamentos mostram a influência da envoltória vertical nas análises (maior peso nos resultados das análises térmicas e orçamentarias). Novamente, para o custo, consideramos a necessidade de elemento estrutural nas edificações com paredes de bloco cerâmico (1.1), blocos de concreto (1.2) e gesso acartonado (1.4). O agrupamento à esquerda é o resultado dos modelos

¹ Custo Unitário Básico - CUB, custo orientativo para o setor da Construção Civil, busca estimar valor total da superestrutura de classes padronizadas de edificações, através da estimativa de custo por metro quadrado para cada tipo de edificação.

que contém parede de gesso (1.4), sendo o sistema que proporcionou melhor eficiência energética e custo intermediário. Já o agrupamento central corresponde as combinações que possuem as alvenarias de blocos cerâmicos (1.1) e blocos de concreto (1.2), que apresentaram um desempenho intermediários e custo mais elevado. Por fim, o agrupamento à direita diz respeito aos modelos que contem parede de concreto (1.3) como envoltória vertical, sendo o sistema que proporcionou pior eficiência energética, mas em contrapartida apresentou menor custo de execução.

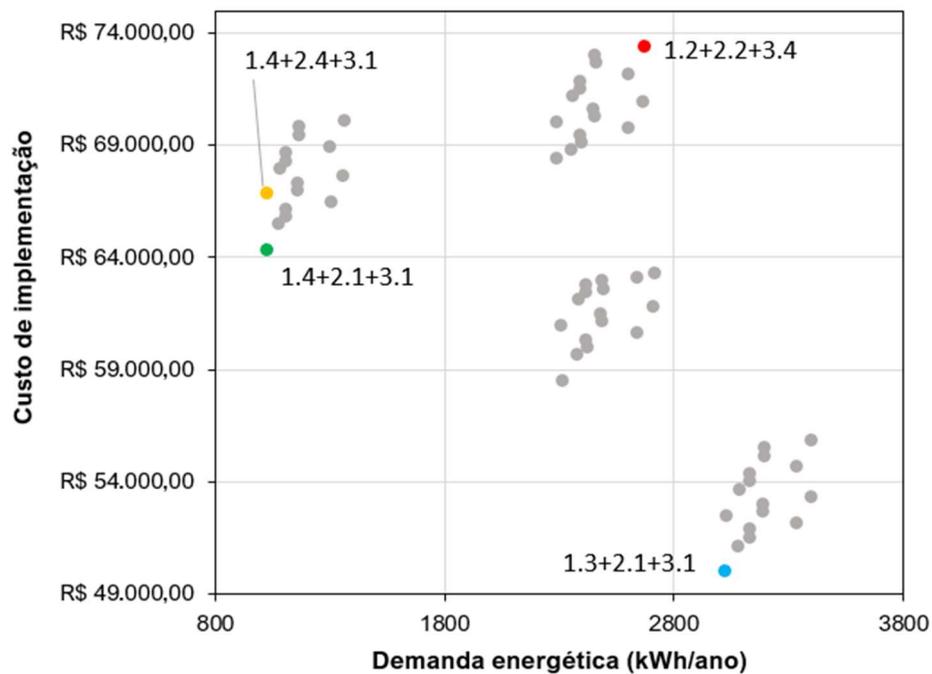


Figura 18: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para HIS 1.

Fonte: autor.

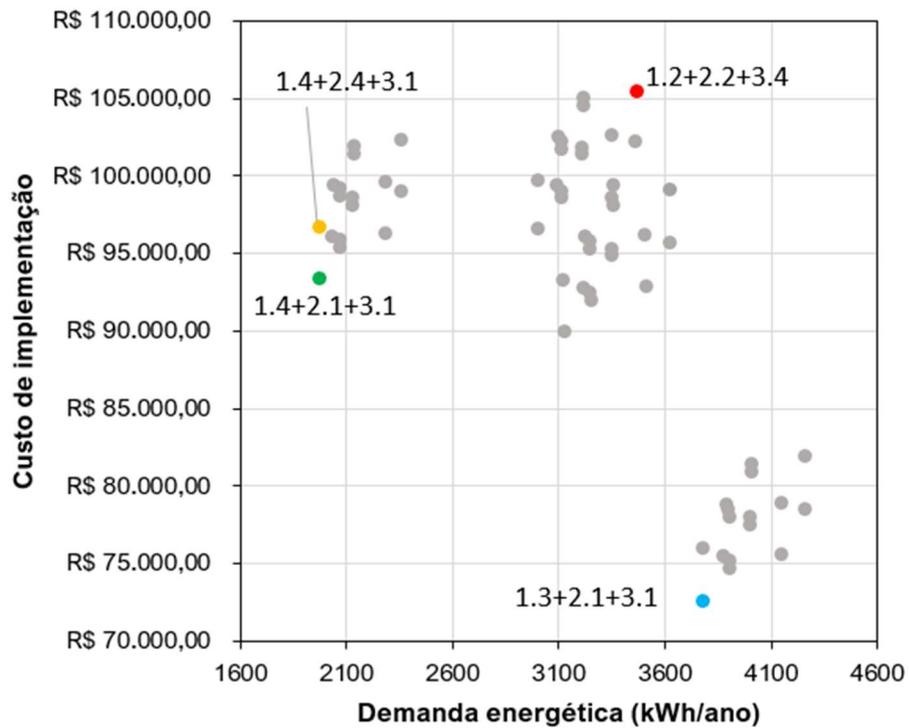


Figura 19: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para HIS 2.

Fonte: autor.

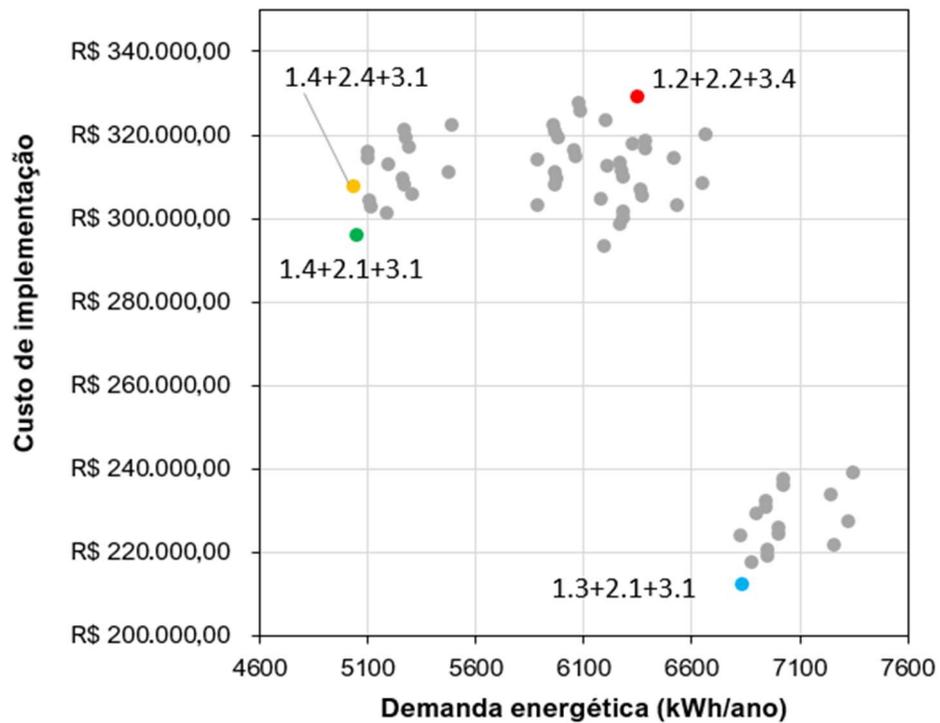
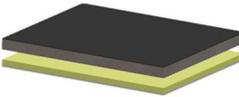


Figura 20: Análise conjunta de eficiência energética e orçamentária para residência de alto padrão. Fonte: autor.

Tabela 9: Esquema das combinações realçadas na Figura 20

	Indicação no gráfico	Combinação (desenho esquemático)
Menor custo		   1.4 2.1 3.1
Maior custo		   1.2 2.2 3.4
Melhor Desempenho térmico		   1.4 2.4 3.1
Melhor Custo-benefício		   1.4 2.1 3.1

Ao compararmos os três gráficos, percebemos que os agrupamentos de pontos são mais distantes na HIS 1, que possui menor área condicionada. Esses agrupamentos começam a se confundir conforme essa área climatizada aumenta - os grupos ficam mais próximos na edificação de alto padrão (Figura 20) que possui maior área condicionada. Esse comportamento também foi observado na Figura 14.

Podemos notar as residências com a combinação de parede de concreto (1.3) com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e porcelanato como piso (3.1) (conjunto 1.3+2.1+3.1) apresentando menor custo (pontos em azul nos gráficos). Contudo, como visto, a parede de concreto não atingiu bons resultados de desempenho térmico e nem ao menos atendem às recomendações da norma NBR 15220 (ABNT, 2022). Assim sendo, as combinações que possuem este tipo de paredes não foram consideradas na identificação daquelas que detêm o melhor custo-benefício para o presente estudo de caso.

Posto isto, em uma análise visual, percebemos que a combinação que apresentou melhor custo-benefício (ponto verde) foi o mesmo para as três edificações estudadas (ponto verde nos gráficos): paredes de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.1+3.1). Essa combinação foi a que apresentou menor custo de execução, juntamente com um desempenho térmico muito próximo à combinação que obteve o melhor desempenho térmico total (ponto amarelo): paredes de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento com manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.4+3.1). Foi observado menos de 1% de diferença entre o desempenho térmico da combinação com melhor custo-benefício para aquela com melhor desempenho. Outras combinações que apresentaram boa relação custo-benefício foram a 1.4+2.4+3.2, 1.4+2.4+3.3 e 1.4+2.3+3.1.

Já a combinação que apresentou o maior custo de execução (ponto vermelho) também apresentou um baixo desempenho térmico: parede de blocos de concreto (1.2) com cobertura laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (2.2) e piso de taco de madeira (3.4) (conjunto 1.2+2.2+3.4). Outras combinações desfavoráveis foram 1.2+2.2+3.3, 1.2+2.2+3.2 e 1.1+2.2+3.4.

A diferença de custo de execução entre a opção mais cara, e a que possuiu melhor custo-benefício foi R\$ 9.014,94 para a HIS 1, R\$ 12.090,13 para a HIS 2 e R\$ 32.844,17 para a residência de alto padrão. Em relação ao custo total das edificações calculado pelo CUB (obra bruta e superestrutura), notamos uma diferença de 9,7% para a HIS 1, 8,5% para a HIS 2 e 4,3% para a residência de alto padrão. Já a diferença entre o desempenho térmico entre as duas opções é de 1640 KWh/ano (correspondendo a R\$ 1082,4 de economia de energia por ano) para HIS 1, 1489 KWh/ano (R\$ 982,74 por ano) para HIS 2 e 1306KWh/ano (R\$ 861,96 por ano) para residência de alto padrão.

Na HIS 1, o resultado de desempenho térmico foi igual nas combinações 1.4+2.1+3.1 e 1.4+2.4+3.1, sendo assim a combinação com melhor custo-benefício (1.4+2.1+3.1) obteve também melhor desempenho. Para as demais edificações, a diferença entre as opções de melhor custo-benefício (combinação 1.4+2.1+3.1) e de

melhor desempenho (1.4+2.4+3.1) foi de R\$ 3.321,72 para a HIS 2, e R\$ 11.538,56 para a residência de alto padrão. Considerando-se a economia em energia elétrica anual entre essas duas opções, R\$ 3,30 para a HIS 2 e R\$ 7,26 para a residência de alto padrão, a diferença entre os sistemas construtivos seria paga em 1006 e 1589 anos, respectivamente. Esse resultado indica que, sob o ponto de vista exclusivamente financeiro, a opção pelo conjunto de melhor desempenho térmico não é viável, embora possa ser vantajosa sob outros aspectos.

Como já mencionado anteriormente, a envoltória vertical foi a que teve maior peso sobre as análises. Ressalta-se que no cenário brasileiro a envoltória de paredes de gesso acartonado (1.4), que obteve melhor custo-benefício, não comumente utilizada. Nos poucos casos em que é utilizada, o gesso acartonado tem seu uso mais difundido para repartições internas da edificação. Para o lado externo, são normalmente adotadas chapas cimentícias resistentes à umidade, como o AQUAPANEL produzido pela Knauf (KNAUF, 2023), material este que é cerca de 75% mais caro do que chapas de gesso convencionais. Isso resulta num acréscimo de custo de R\$ 1.575,00 para residência da HIS 1 (1,7% do custo total dos sistemas), R\$ 2.200,00 para HIS 2 (1,6% do custo total dos sistemas) e de R\$ 4.305,00 para residência de alto padrão (0,6% do custo total dos sistemas). Mota et al. (2022) estudou a execução deste sistema e verificou que ele pode substituir a alvenaria convencional sem comprometer segurança, acabamento e manutenção. Salienta-se a necessidade de refazer análises energéticas considerando propriedades deste material para avaliar seu impacto nos resultados, embora o autor acredite que as diferenças não serão significativas, dado que as condutividades térmicas e espessuras são próximas 0,36 W/m·K (CEMENT BOARD FABRICATORS, 2023) para a placa cimentícia versus 0,17-0,35 W/m·K (ABNT, 2005) para a de gesso acartonado.

Por sua vez, a envoltória de paredes de concreto vem sendo amplamente utilizadas na execução de HIS, incentivada por políticas governamentais como Programa Minha Casa Minha Vida e Casa Verde e Amarela (SILVA, LORENZON, et al., 2013). Apesar de resultar em um custo final menor para a construção da residência, esse sistema obteve os piores resultados de desempenho térmico e não atende as exigências da norma para a zona bioclimática estudada. Iskandar et al.

(2019) também demonstrou a falta de desempenho térmico deste sistema em seu estudo de caso. Dessa forma, surgem algumas questões sobre a real eficiência (e custo-benefício) das paredes de concreto em climas parecidos ao analisado, indicando que o uso indiscriminado deste sistema por todo Brasil pode comprometer a renda e a saúde de seus usuários a longo prazo.

Em síntese, notamos que a escolha por materiais e sistemas construtivos mais caros (os quais são comumente assimilados a um maior controle tecnológico envolvido) podem não refletir em um melhor desempenho térmico à edificação. Entretanto, percebemos que sistemas construtivos mais baratos também podem não oferecer o melhor desempenho térmico. Ou seja, simulações energéticas e avaliações de desempenho térmico aliada a análises de custo são importantes para uma correta tomada de decisão pelo projetista quanto aos materiais a serem empregados na construção de uma edificação.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho investigou a contribuição das propriedades de diferentes materiais construtivos que compõem as envoltórias, bem como os custos para execução, para três edificações distintas. Para cada edificação, foram feitas 64 análises de desempenho térmico e de custo dos serviços provenientes da permutação de 4 tipos de paredes, 4 tipos de coberturas e 4 tipos de pisos para 3 edificações, resultando num total de 192 simulações energéticas e 192 análises financeiras. Ambas as análises foram feitas utilizando software Autodesk Revit, no qual foram inseridas propriedades térmicas dos materiais constituintes de cada sistema juntamente com os custos para sua execução.

A combinação que obteve melhor resultado de desempenho térmico foi de parede de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento com manta de fibra de vidro sobre o forro (2.4) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.4+3.1) para as três edificações. Na HIS 1, observamos a combinação envolvendo parede de gesso acartonado (1.4), cobertura com telha de fibrocimento sem manta de fibra de vidro sobre o forro (2.1) e piso com porcelanato (3.1) (combinação 1.4+2.1+3.1) tendo resultado similar a essa referida combinação.

Por sua vez, a combinação que envolveu parede de concreto (1.3), cobertura laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (2.2) e piso de taco de madeira (3.4) (combinação 1.3+2.2+3.4) obteve maior custo de execução (considerando paredes somente como fechamento). Também notamos essa combinação propiciando o pior resultado de desempenho térmico às residências. Contudo, a parede de concreto não atende às especificações termofísicas dispostas na NBR 15220 (ABNT, 2022), levando ao nosso descarte das combinações envolvendo este tipo de sistema na análise de custo-benefício. Assim, dentre as combinações que atendem à norma, observamos o conjunto 1.2+2.2+3.4 (parede de blocos de concreto (1.2) com cobertura laje impermeabilizada com lã de vidro sobre forro (2.2) e piso de taco de madeira (3.4)) com o maior custo de execução para as residências.

Também notamos que a diferença de desempenho térmico entre a opção que mais se destacou neste quesito (1.4+2.4+3.1) e a combinação da que teve melhor custo-benefício (1.4+2.1+3.1) foi pouco relevante. Trata-se de apenas 5 KWh/ano

para HIS 2 e 11 kWh/ano para residência de alto padrão, enquanto a diferença de custo foi de R\$ 3.321,72 para HIS 2 e R\$ 11.538,56 para residência de alto padrão. Já a diferença de desempenho entre a combinação com maior custo de execução (1.2+2.2+3.4) e a com melhor custo-benefício (1.4+2.1+3.1) foi de 1640 kWh/ano (R\$ 1082,4/ano) para HIS 1, 1489 kWh/ano (R\$ 982,74/ano) para HIS 2 e 1306kWh/ano (R\$ 861,96/ano) para residência de alto padrão. A diferença custo para essas combinações foi de R\$ 9.014,94 para HIS 1, R\$ 12.090,13 para HIS 2 e R\$ 32.844,17 para residência de alto padrão. Ou seja, além de uma economia na construção, a economia anual gerada com energia é bastante significativa ao se selecionar os sistemas mais adequados.

Como limitações desse trabalho, foram analisadas somente três edificações residenciais, com características específicas (ex. orientação norte, sem vegetação ao redor) e apenas para a cidade de São Paulo, SP. É possível que edificações diferentes ou a simulação em regiões diferentes poderiam resultar em diferentes conjuntos de melhores sistemas. As análises orçamentárias também estão limitadas às tabelas de referências SINAPI e SBC publicadas em outubro de 2022. Essa constatação não tira o mérito do presente trabalho, que é justamente ressaltar a importância dessa avaliação.

Os resultados mostraram que todas as envoltórias possuem influência sobre o desempenho térmico das edificações. A envoltória que mostrou maior influência sobre resultado final foi a vertical (as paredes). Sobre os materiais que compõem as envoltórias, podemos afirmar que a utilização de um material que possui propriedades térmicas que o classifiquem isoladamente como um material mais isolante não é garantia de uma maior eficiência energética, uma vez que os melhores desempenhos são resultados de uma complexa combinação de fenômenos. No caso das análises em questão, as paredes e as coberturas foram mais efetivas ao se utilizar de uma combinação de materiais com propriedades mais isolantes. Porém a envoltória horizontal inferior (piso) que tinha propriedade menos isolantes foi a que obteve melhores resultados, por possibilitar maiores trocas com o solo. O efeito da capacitância térmica dos sistemas também variou conforme os casos.

Observamos também que o sistema construtivo de paredes de bloco cerâmicos, um dos sistemas mais tradicionalmente utilizados no país, não apresentou bons resultados nas análises de desempenho térmico. Assim, ressaltamos a importância de se fazer ambas as análises (térmica e orçamentárias) para a viabilização de um sistema construtivo otimizado. Em síntese, vimos que realizar análises energéticas e de custos dos sistemas construtivos de uma edificação pode levar à melhoria do conforto térmico dos usuários a longo prazo, com diferenças pouco significativas no desembolso total da obra. E foi possível concluir também que o uso de um software BIM permitiu que essas simulações fossem feitas de forma relativamente prática e rápida, e com significativo impacto para a edificação e seus usuários por toda a sua vida útil.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Diversos outros fatores possuem grande importância quando se trata de eficiência energética, como variações das esquadrias, utilização de elementos de sombreamento e uso de materiais inovadores para isolamento térmico. Assim, a execução de análises mais abrangentes, que considerem mais elementos de uma edificação, o custo dos outros sistemas, assim como análise em outras zonas bioclimáticas, são de extrema importância para que se possa tomar noções mais gerais a respeito do desempenho térmico das edificações em função do custo de implementação das estratégias construtivas.

A avaliação do tempo de execução de um empreendimento está diretamente ligada à sua viabilidade, um fator que pode ser incluído na avaliação principalmente ao considerarmos edificações com interesse social.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15220 -Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro. 2005.
- ABNT. **NBr ISO 12006-2 - Construção de edificações - Organização de informações da construção: Estruturas para classificação de informação**. [S.I.]. 2010.
- ABNT. **NBR 15965 - Sistemas de classificação de informação de construção**. [S.I.]. 2011.
- ABNT. **NBR 15575 - Edifícios Residenciais Desempenho**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2013.
- ABNT. **NBR 15575 - Edifícios Residenciais - Desempenho**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2021.
- ABNT. **NBR 15220 - Desempenho térmico em edificações**. Rio de Janeiro. 2022.
- AIA. Project Building Information Modeling Protocol Form. **AIA Document G202**, 2013.
- ALBUQUERQUE, D. L. S.; SALGUEIRO, T. L. T.; CAVALCANTE, R. D. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS PREÇOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL PRÉ- E PÓS-PANDEMIA. **Cadernos de Graduação**, Alagoas, Outubro 2021. 23-35.
- ANSYS. Ansys Fluent. **Ansys**, 2022. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>>. Acesso em: 30 Nov. 2022.
- ARAÚJO, L. G.; RODRIGUES, C. O. D. M.; PEDRINI, A. As ações de eficiência energética no âmbito da PBE-Edifica e seus impactos no Brasil nos últimos 11 anos. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, Porto Alegre, 2020.
- ASHRAE. **55 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. [S.I.]. 2017.
- AUTODESK. Autodesk. **Revit**: software BIM para projetistas, construtores e desenvolvedores, 2022. Disponível em:

<<https://www.autodesk.com.br/products/revit/overview?term=1-YEAR&tab=subscription>>. Acesso em: 09 out. 2022.

AUTODESK. Autodesk Insight. **Autodesk**, 2022. Disponível em: <<https://www.autodesk.com/products/insight/overview>>. Acesso em: 24 Outubro 2022.

AUTOQI. AutoQi Eberick. **AutoQi**, 2022. Disponível em: <<https://www.altoqi.com.br/eberick>>. Acesso em: 09 out. 2022.

BESEN, P.; WESTPHAL, F. S. FACHADAS DE VIDRO NO BRASIL: UM ESTUDO COMPARATIVO DE VIABILIDADE ECONÔMICA, Maceió, Novembro 2014.

BIM FORUM BRASIL. Gestão das iniciativas. **BIM Forum Brasil**, 2022. Disponível em: <<https://www.bimforum.org.br/post/gest%C3%A3o-das-iniciativas>>. Acesso em: 10 out. 2022.

BIMFORUM. Level of Development Specification for Building, 28 Junho 2022. Disponível em: <<https://bimforum.org/resource/%ef%bf%bc%ef%bf%bclevel-of-development-specification/>>. Acesso em: 19 out. 2022.

BIMFORUM². BIMFORUM², 2021. Disponível em: <<https://bimforum.org/>>. Acesso em: 09 outubro 2022.

BRASIL. Lei N°10.295, de 17 de Outubro de 2001. **Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências.**, Brasília,DF, Outubro 2001.

BRASIL. Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edificações. **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO)**., Brasília, 2012.

BRASIL. Decreto N° 9.377, de 17 de maio de 2018. **Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling.**, Brasília,DF, maio 2018.

BRASIL. DECRETO N° 10.306, DE 2 DE ABRIL DE 2020. **Estratégia Nacional de Disseminação do Building Information Modelling- EstratégiaBIM**, Brasília, DF, Abril 2020.

BRASIL. LEI n° 14.133, de 1° de abril de 2021. **Lei de Licitações e Contratos Administrativos.**, Brasilia, DF, Abril 2021.

BRITO, B. L. D.; FERREIRA, E. A. M.; COSTA, D. B. ESTIMATIVAS DE CUSTOS COM BASE EM BIM E ALGORÍTMOS GENERATIVOS PARA DECISÕES DE PROJETO, Fortaleza, Novembro 2017.

CAMPESTRINI, T. F. et al. **Entendendo BIM**. 1°. ed. Curitiba: [s.n.], 2015.

CARDOSO, R. S. **Orçamento de obras em foco**. 4. ed. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2020.

CEMENT BOARD FABRICATORS. CEMENT BOARD FABRICATORS-TECHNICAL DATA. **CEMENT BOARD FABRICATORS**, 2023. Disponível em: <<https://cementboardfabricators.com/technical-data/>>. Acesso em: 22 Março 23.

CHAM. Phoenix. **Cham**, 2022. Disponível em: <<https://www.cham.co.uk/phoenix.php>>. Acesso em: 11 Nov. 2022.

CIRIBINI, A. Level of Detail e Level of Development: i processi di committenza e l'Information Modelling. **TECHNE-Journal of technology for architecture and environment**, p. 90-99, 2013.

COELHO, F. F. D. M. O POTENCIAL E LIMITAÇÕES DO BIM - BUILDING INFORMATION MODELING PARA O ATENDIMENTO DA ABNT NBR 15575, Niteroi, 2013.

CONSELHO DE ARQUITETURA E URBANISMO DO BRASIL. Como o Brasileiro constroi. **Pesquisa CAU/ BR DATAFOLHA**, 2015. Disponível em: <<https://www.caubr.gov.br/pesquisa2015/como-o-brasileiro-constroi/>>. Acesso em: 21 Outubro 2022.

DOS SANTOS, G. H.; FOGIATTO, M. A.; MENDES, N. Numerical analysis of thermal transmittance of hollow concrete blocks. **Journal of Building Physics**, p. 1-18, 2017.

EASTMAN, C. et al. **Manual de BIM**: um guia de modelagem da informação da construção para arquitetos, engenheiros, gerentes, construtores e incorporadores. Porto Alegre: Bookman Editora LTDA., 2008.

ENEL. Tarifa de Energia Elétrica. **ENEL**, 2023. Disponível em: <https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Para_Voce/tarifa-energia-eletrica.html>.

Acesso em: 25 fev. 2023.

ENERGYPLUS. EnergyPlus, 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>.

Acesso em: 20 Outubro 2022.

ENERGYPLUS. EnergyPlus Downloads. **EnergyPlus**, 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net/downloads>>. Acesso em: 23 Outubro 2022.

FOSSATI, ; LAMBERTS, R. Eficiência energética da envoltória. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, p. 11, Junho 2010. ISSN 10.1590/S1678-86212010000200004.

FRANCO, L. C. et al. Design and thermal evaluation of a social housing model conceived with bioclimatic principles and recycled aggregates. **Elsevier**, Ouro Preto, Julio 2019. ISSN 10.1016/j.scs.2019.101725.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 7. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2006.

GOVERNO DE SANTA CATARINA. **Caderno de especificações de projetos em BIM**. [S.l.]: [s.n.], 2018.

HERNANDEZ, C. R. B. Thinking parametric design: introducing parametric Gaudi, Cambridge, p. 16, 2005.

HM GOVERNMENT. The Building Regulations, Part L1A: Conservation of fuel and power, 2010.

INÉIA, A.; GHIGGI, A.; SPINELLI, R. DESEMPENHO TÉRMICO E ACÚSTICO: AVALIAÇÃO DAS PROPOSTAS DE MELHORIAS DE DESEMPENHO TÉRMICO DE UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR MINHA CASA MINHA VIDA. **Revista Destaques Acadêmicos**, v. 12, n. 4, dez. 2020. ISSN 10.22410/issn.2176-3070.v12i4a2020.2367.

INMETRO. PBE - Programa Brasileiro de Etiquetagem. **PBE Edifica**, 2020. Disponível em: <<https://pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em: 23 set. 2022.

ISKANDAR, R.; RESENDE, F. B. D.; BRANDSTETTER, M. C. G. O. Análise de custo e desempenho térmico para um projeto de habitação de interesse social.. **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO**, Porto Alegre, p. 1-11, Out 2019. ISSN DOI: 10.46421/sibragec.v11i00.22.

JEREISSAT, G. et al. Análise do uso da metodologia BIM nos órgãos públicos do estado do Ceará/Brasil, 2020.

JOSEPH, ; JOSE, V.; HABEEB, A. Thermal Performance of Buildings: Case Study and Experimental Validation of Educational Building. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, v. 4, n. 6, p. 8, Junho 2015.

KEMPTER, E. D. et al. ESCANEAMENTO 3D A LASER, FOTOGRAMETRIA E MODELAGEM DA INFORMAÇÃO DA CONSTRUÇÃO PARA GESTÃO E OPERAÇÃO DE EDIFICAÇÕES HISTÓRICAS. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Paulo, dezembro 2015. ISSN <http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v10i2.102710>.

KINGSCOTT, T. C. C. et al. Desempenho térmico de edificações: estudo comparativo das normas do Brasil (NBR 15575 com emendas 2021 e NBR 15220) e do Reino Unido (Buildings Regulations - Part L). **XVI Congresso latino de patología de la construcción y XVIII de control de calidad en la construcción.**, Ouro Preto, p. 12, Out. 2021.

KNAUF. CHAPA DE CIMENTO AQUAPANEL® UNIVERSAL 8 MM. **Knauf**, 2023. Disponível em: <<https://knauf.com.br/produto/cimenticia-universal-aquapanel-8-mm>>. Acesso em: 24 fevereiro 2023.

LAMBERTS, ; GHISI, E.; PAPST, A. L. **Desempenho Térmico de Edificações**. 7. ed. Florianópolis: Universidade Federal, 2000.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: ELLETROBRAS PROCEL, 2014.

LEROY MERLIN. Leroy Merlin. **Leroy Merlin**, 2023. Disponível em: <<https://www.leroymerlin.com.br/>>. Acesso em: 13 jan. 2023.

LIM, B. B. P. Energy Conservation in Buildings and the Indoor Environment—A Review. **Architectural Science Review**, v. 26, n. 1, 6-12 1983. ISSN 10.1080/00038628.1983.9697250.

LIMMER, C. V. **Planejamento, Orçamentação e Controle de Projetos e Obras**. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

LINS, F. U. **Análise de alternativas para melhoria do desempenho térmico de edifícios em alvenaria estrutural em face da norma brasileira 15.575**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 63. 2012.

MACHADO, E. L. et al. Seleção de sistemas construtivos utilizando BIM e método de tomada de decisão multicritério. **ALCONPAT**, p. 15, 2018.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamento de obras**. 3ª. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

MENDES, C. J. et al. Factors affecting the specific heat of conventional and residue-based. **Construction and Building Materials**, v. 237, p. 117597, 2020.

MENDES, et al. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, 2005.

MENDES, V. F. **Análise de sensibilidade da condutividade térmica, calor específico, espessura e massa específica das argamassas de revestimento em relação ao desempenho térmico de edifícios**. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 64. 2021.

MOHAMMAD, S.; SHEA, A. Performance evaluation of modern building thermal envelope designs in the semi-arid continental climate of Tehran. **Buildings**, v. 3, n. 4, p. 674-688, Outubro 2013. ISSN 10.3390/buildings3040674.

MONTIEL-SANTIAGO, F. ; HERMOSO-ORZÁEZ, M. J.; TERRADOS-CEPEDA, J. Sustainability and Energy Efficiency: BIM 6D. Study of the BIM Methodology Applied to Hospital Buildings. Value of Interior Lighting and Daylight in Energy Simulation. **Sustainability**, 2020. ISSN <https://doi.org/10.3390/su12145731>.

MORISHITA , C. et al. **Catálogo de propriedades térmicas de paredes e coberturas**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Florianópolis, p. 13. 2010.

MOTA, G. C.; MIRANDA, W. P.; PINHEIRO, E. C. N. M. A viabilidade econômica do uso de paredes em Drywall em uma. **Brazilian Journal of Development**, Manaus, 29 maio 2022. 14.

OLIVEIRA, F. M. D.; BITTENCOUR, L. S.; DÓRIA, R. S. Uma ferramenta BIM para simulação de eficiência energética nas fases iniciais de projeto. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, 15 mar 2020. 24.

OLIVEIRA, L.; SOARES, R. G.; SANTOS, S. X. Desempenho térmico das edificações: estudo comparativo entre o. **Petra**, v. 2, p. 20, julho 2016.

ORÇAFASCIO. Orçafascio. **Orçafascio**, 2023. Disponível em: <<https://orcafascio.com/>>. Acesso em: 15 janeiro 2023.

PACHECO, F. D. M.; SILVA, M. L. **Análise de custo e desempenho térmico de diferentes sistemas de cobertura e esquadrias de um projeto de habitação de interesse social (HIS) no Estado de Goiás**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS. Goiânia, p. 72. 2018.

PASA, C. C. M. U. et al. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES E SUARELAÇÃO COM OS MATERIAIS CONSTRUTIVOS EMPREGADOS. **Produção Online**, janeiro 2012.

PIASECKIENĖ, G. Dimensions of BIM in literature: review and analysis. **Mokslas – Lietuvos ateitis / Science – Future of Lithuania**, v. v. 14, Fevereiro 2022.

PIEIDADE, A. C. D.; RODRIGUES, A. M.; RORIZ, L. F. **Climatização em edifícios: envolvente e comportamento térmico**. 2. ed. Alfragide: Orion, 2003.

PROJETEEE. INÉRCIA TÉRMICA PARA AQUECIMENTO. **PROJETEEE**, 2022. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteee/estrategia/inercia-termica-para-aquecimento/>>. Acesso em: 23 set. 2022.

RIBEIRO, S. E. C. et al. O BIM NO CENÁRIO DE ARQUITETURA E CONSTRUÇÃO CIVIL, 2016.

RUSCHEL, R. C.; ANDRADE, M. L. V. X. BIM: CONCEITOS, CENÁRIO DAS PESQUISAS PUBLICADAS NO BRASIL E TENDÊNCIAS. **Academia**, 2009.

SENA, T. C. et al. BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) E FERRAMENTAS 4D E 5D PARA SIMULAÇÃO E TOMADA DE DECISÃO NO PROCESSO DE PROJETO DE EDIFICAÇÕES. **ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 2022.

SILVA, G.; BALZ, A.; PEDROZO, É. C. Eficiência Das Dimensões Dos Processos Building Information Modeling No Ciclo De Vida Das Edificações. **INGENIO**, v. 3, p. 10, 2021.

SILVA, N. N. et al. LEVANTAMENTO DE SOLUÇÕES TECNOLÓGICAS EM CONCRETO PARA HABITAÇÕES DE INTERESSE SOCIAL. **3º Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto pré-moldado.** , São Carlos, julho 2013. 14.

SILVA, V. G.; SILVA, M. G.; AGOPYAN, V. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO AMBIENTAL DE EDIFÍCIOS: ESTÁGIO. **Academia**, 2001. 16.

SODRÉ, W. W. B. TECNOLOGIA BIM: A IMPORTÂNCIA DO DECRETO 10306 NA DEMOCRATIZAÇÃO DA METODOLOGIA NO PAÍS. **REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR NÚCLEO DO**, Dezembro 2021.

THE BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BS EN 16798 - Energy performance of buildings. **BSI Standarts Limited**, 2019.

TORRES, T.; BRASILEIRO, A. INFLUÊNCIA DAS ESQUADRIAS NA CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE HABITAÇÕES NO RJ. **Academia**, Maceió, Maio 2014.

VERBEKE, S. Renewable and Sustainable Energy Reviews. **ELSEVIER**, 2017.

VIANA, F. S.; SOUZA, H. A.; GOMES, A. P. RESIDÊNCIA EM CONTÊINER: COMPARATIVO DE ESTRATÉGIAS PARA A MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO. **Periodicos UNICAMP - pesquisa em arquitetura e construção**, Campinas, março 2019. 21.

