

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCILENE DE LIMA ROCHA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO EM PÓS-OCUPAÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO ENTRE WOOD FRAME E ALVENARIA CONVENCIONAL
SOB A ÓTICA DA ABNT NBR 15.575

PALOTINA

2025

LUCILENE DE LIMA ROCHA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO EM PÓS-OCUPAÇÃO:
UM ESTUDO DE CASO ENTRE WOOD FRAME E ALVENARIA CONVENCIONAL
SOB A ÓTICA DA ABNT NBR 15.575

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental, Setor de Palotina, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutora em Engenharia e Tecnologia ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo

PALOTINA

2025

Universidade Federal do Paraná. Sistemas de Bibliotecas.
Biblioteca UFPR Palotina.

R672 Rocha, Lucilene de Lima

Análise comparativa do desempenho térmico em
pós-ocupação: um estudo de caso entre Wood Frame e
alvenaria convencional sob a ótica da ABNT NBR 15.575
/ Lucilene de Lima Rocha. – Palotina, PR, 2025.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná,
Setor Palotina, PR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Elisandro Pires Frigo.

1. Conforto térmico. 2. Crédito de carbono
3. Desempenho higrotérmico. I. Frigo, Elisandro Pires.
II. Universidade Federal do Paraná. III. Título.

CDU 62

Bibliotecária: Aparecida Pereira dos Santos – CRB 9/1653



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR PALOTINA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA E
TECNOLOGIA AMBIENTAL - 40001016173P5

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LUCILENE DE LIMA ROCHA**, intitulada: **ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO EM PÓS-OCUPAÇÃO: UM ESTUDO DE CASO ENTRE WOOD FRAME E ALVENARIA CONVENCIONAL SOB A ÓTICA DA ABNT NBR 15.575**, sob orientação do Prof. Dr. ELISANDRO PIRES FRIGO, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutora está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Palotina, 04 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica
05/08/2025 19:34:52.0
ELISANDRO PIRES FRIGO
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica
04/08/2025 17:24:23.0
JONATHAN DIETER
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica
05/08/2025 18:07:15.0
DOUGLAS GUEDES BATISTA TORRES
Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVEL)

Assinatura Eletrônica
05/08/2025 10:30:01.0
AUREA LUCIA VENDRAMIN GEORGI
Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO BELAS ARTES DE SÃO PAULO)

Assinatura Eletrônica
05/08/2025 18:32:38.0
CHRISTIAN VALCIR KNIPHOF DE OLIVEIRA
Avaliador Externo (CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVEL)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão a Deus por me guiar com discernimento e fortaleza ao longo desta jornada.

Ao Professor Dr. Elisandro Frigo, meu orientador, estendo meus agradecimentos pela confiança em meu trabalho e por ser um grande impulsionador do meu progresso.

Não posso deixar de reconhecer os professores do Programa PPGETA - UFPR, cujos ensinamentos e incentivos foram fundamentais ao longo desta trajetória acadêmica.

À minha querida filha, expresso um agradecimento especial por sua generosa compreensão das minhas limitações e por sua valiosa contribuição para a realização deste trabalho.

Quero manifestar minha gratidão à minha família, em particular aos meus irmãos e pais, verdadeiros exemplos de dedicação e vida, que não pouparam esforços para me apoiar.

Ao meu esposo, dedico um agradecimento profundo pelo apoio inabalável e pela força que dedicou a mim ao longo destes anos. Suas palavras de incentivo e lembretes constantes sobre nossos objetivos de vida foram fundamentais para que eu nunca desistisse dos meus sonhos. Sou imensamente afortunada por tê-lo ao meu lado nesta jornada.

Por fim, mas não menos importante, quero agradecer a todos os meus familiares e amigos que estiveram presentes ao meu lado durante esta caminhada, oferecendo seu apoio e encorajamento.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigada.

*"A arquitetura é um gesto. Um gesto que serve a humanidade, que constrói
um habitat melhor para a vida."
— Paulo Mendes da Rocha*

RESUMO

A busca por edificações de alto desempenho, alinhadas à norma ABNT NBR 15.575, impulsiona a comparação entre sistemas construtivos. Esta tese de doutorado teve como objetivo principal comparar o desempenho térmico e higrotérmico entre uma edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e uma em Wood Frame, avaliando sua conformidade com a NBR 15.575 e investigando estratégias para otimização do conforto e potencial de crédito de carbono. A pesquisa empregou uma abordagem quantitativa comparativa, realizando o monitoramento higrotérmico in loco de dois protótipos reais com orientações e condições climáticas análogas, por meio de medições horárias ao longo das quatro estações do ano. Os resultados demonstraram, de forma conclusiva, a superioridade do sistema Wood Frame, que se manteve até 3,55°C mais fresco no verão e 2,25°C mais quente no inverno. A principal vantagem foi a estabilidade térmica, com flutuações até 33% menores que na alvenaria. Adicionalmente, o Wood Frame demonstrou um controle de umidade muito superior, mantendo os níveis internos na faixa de conforto ideal (40-60%), em contraste com a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, que frequentemente ultrapassa 70%. A significância estatística dessas diferenças foi confirmada por testes de hipóteses, validando a maior eficiência do Wood Frame em superar os níveis de desempenho da norma, reduzir a dependência de climatização artificial e, conseqüentemente, o consumo energético. A pesquisa fornece subsídios para a evolução da normativa e destaca o sistema Wood Frame como uma solução construtiva mais confortável, saudável e sustentável.

Palavras-chave: Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575; Edificações em Wood Frame; Edificação Convencional; Conforto Térmico; Desempenho Higrotérmico; Crédito de Carbono.

ABSTRACT

The pursuit of high-performance buildings, in line with the ABNT NBR 15.575 standard, necessitates a comparison between construction systems. This doctoral thesis aimed to compare the thermal and hygrothermal performance of a conventional masonry building and a Wood Frame building, assessing their compliance with NBR 15.575 and investigating strategies to optimize comfort and the potential for carbon credits. The research employed a quantitative comparative methodology, conducting on-site hygrothermal monitoring of two real prototypes with analogous orientations and climatic conditions, through hourly measurements throughout the four seasons. The results conclusively demonstrated the superiority of the Wood Frame system, which remained up to 3.55°C cooler in summer and 2.25°C warmer in winter. The primary advantage was its thermal stability, with fluctuations up to 33% lower than in the masonry counterpart. Furthermore, the Wood Frame exhibited far superior humidity control, maintaining internal humidity levels within the ideal comfort range (40-60%), in contrast to the conventional masonry, which frequently exceeded 70%. The statistical significance of these differences was confirmed by hypothesis testing, validating Wood Frame's greater efficiency in exceeding the standard's performance levels, reducing reliance on mechanical HVAC, and consequently, its energy consumption. This research provides a basis for the evolution of the normative framework and establishes the Wood Frame system as a demonstrably more comfortable, healthier, and sustainable construction solution.

Keywords: ABNT NBR 15.575 Performance Standard; Wood Frame Building; Conventional Building; Thermal Comfort; Hygrothermal Performance; Carbon Credit.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Edificação Convencional	38
QUADRO 1 – Principais características do sistema convencional de construção	41
FIGURA 2 – Estratégias de controle climático a serem adotadas no projeto arquitetônico	46
FIGURA 3 – Exemplo de estrutura em Wood Frame	56
FIGURA 4 – Composição das camadas que constituem a parede externa e interna do sistema Wood Frame respectivamente	58
QUADRO 2 – Principais características do sistema construtivo Wood Frame	61
FIGURA 5 – Esquema de Localização País, Estado, Cidade	79
FIGURA 6 – Esquema de Localização na cidade	80
FIGURA 7 – Carta Psicrométrica Bioclimática	81
FIGURA 8 – Carta Solar	82
FIGURA 9 – Esquema de Alvenaria Convencional de Wood Frame	83
FIGURA 10 – Esquema de Wood Frame	83
FIGURA 11 – Descrição do Wood Frame	84
FIGURA 12 – Estrutura em Wood Frame	84
FIGURA 13 – Exemplo da estrutura de um apartamento modelo do objeto de estudo em fase da obra	84
FIGURA 14 – Local do estudo, Condicionantes	85
FIGURA 15 – Alvenaria Convencional	86
Figura 16 – Detalhe Alvenaria Convencional	86
Figura 17 – Local do estudo, Aspectos físicos	86
FIGURA 18 – Termo Higrômetro Digital - DT-322 - CEM	87
FIGURA 19 – Arduino/Microcontroladora	88
FIGURA 20 – Real Time Clock RTC DS3231 AutoCore Robótica -Arduino	88
FIGURA 21 – Cartão de Memória MicroSD 16GB com Adaptador SD Goldentec	89
FIGURA 22 – Disposição externa no edifício de Alvenaria Convencional	90
FIGURA 23 – Disposição externa no edifício em Wood Frame	90
FIGURA 24 - Disposição interna no edifício de Alvenaria Convencional	91
FIGURA 25 - Disposição interna no edifício Em Wood Frame	91
FIGURA 26 – Dados Alvenaria Convencional - Outono	98
FIGURA 27 – Dados Alvenaria Convencional - Inverno	99
FIGURA 28 – Dados Alvenaria Convencional - Primavera	99
FIGURA 29 – Dados Alvenaria Convencional - Verão	100
FIGURA 30 – Dados Wood Frame - Outono	100
FIGURA 31 – Dados Wood Frame - Inverno	101
FIGURA 32 – Dados Wood Frame - Primavera	101
FIGURA 33 – Dados Wood Frame - Verão	102
GRÁFICO 1 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono	110

GRÁFICO 2 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno	112
GRÁFICO 3 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera	114
GRÁFICO 4 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão	116
GRÁFICO 5 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono	119
GRÁFICO 6 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno	121
GRÁFICO 7 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera	123
GRÁFICO 8 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão	125

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Outono	
103	
TABELA 2 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Inverno	
103	
TABELA 3 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Primavera	
104	
TABELA 4 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Verão	105
TABELA 5 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Outono	106
TABELA 6 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Inverno	107
TABELA 7 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Primavera	108
TABELA 8 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Verão	109
TABELA 9 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono	110
TABELA 10 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno	112
TABELA 10 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera	
113	
TABELA 11 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão	115
TABELA 12 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono	118
TABELA 13 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno	120
TABELA 14 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera	122
TABELA 15 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão	124
TABELA 16 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão	128

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

AVAC – Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado

EN – European Norm (Norma Europeia)

ISO – International Organization for Standardization

NBR – Norma Brasileira

PPD – Predicted Percentage of Dissatisfied (Percentual Previsto de Insatisfeitos)

PMV – Predicted Mean Vote (Voto Médio Predito)

PPGETA – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia Ambiental

RTC – Real Time Clock (Relógio de Tempo Real)

UFPR – Universidade Federal do Paraná

VUP – Vida Útil de Projeto

LISTA DE SÍMBOLOS

Σ - Somatório de números

Π - Produtório de números

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	17
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos	18
1.3 METODOLOGIA	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 TEORIAS E MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO	23
2.1.1 O modelo estático de balanço de calor (PMV/PPD de Fanger)	24
2.1.2 O modelo de conforto adaptativo	25
2.2 CONCEITOS E REQUISITOS DA NORMA	27
2.2.1 A transição de normas prescritivas para normas de desempenho	27
2.2.2 Implicações para a inovação e os desafios técnicos na construção civil	29
2.2.3 Impacto na construção de edificações	32
2.3 EDIFICAÇÃO DE ALVENARIA CONVENCIONAL	34
2.3.1 Características e desafios das construções no sistema convencional	40
2.3.2 Estratégias para conforto térmico e eficiência energética no sistema convencional	42
2.3.4 Estratégias bioclimáticas e desempenho térmico em edificações de alvenaria convencional	46
2.3.5 Isolamento térmico e características dos materiais	49
2.3.6 A relação desafiadora entre a alvenaria convencional e os créditos de Carbono	51
2.4 EDIFICAÇÃO NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM WOOD FRAME	53
2.4.1 Características e benefícios do sistema construtivo em Wood Frame	60
2.4.2 Conforto térmico e sustentabilidade no sistema construtivo Wood Frame	62
2.4.3 Estratégias Bioclimáticas e desempenho térmico em edificações	67
2.4.4 Isolamento Térmico e Características dos Materiais	68
2.4.5 Ventilação e Iluminação Natural	70
2.4.5.1 Eficiência Energética e o Ciclo de Vida	72
2.4.6 O potencial do Wood Frame na geração de créditos de Carbono	74
3 MATERIAL E MÉTODOS	76
3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA	77
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO	77
3.2.1 Edificação em Wood Frame	83
3.2.2 Edificação em Alvenaria Convencional	85
3.3 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS	86
3.3.1 Posicionamento dos Sensores	89

3.3.1.1 Sensor Externo	89
3.3.1.2 Sensor Interno	90
3.3.3 Procedimiento de Coleta	91
3.4 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE DADOS	93
3.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO	95
4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	98
4.1 DESEMPENHO NO OUTONO	109
4.2 DESEMPENHO NO INVERNO	111
4.3 DESEMPENHO NA PRIMAVERA	113
4.5 COMPARAÇÃO DE DADOS DE UMIDADE RELATIVA ENTRE ALVENARIA CONVENCIONAL E WOOD FRAME	117
4.5.1 Umidade relativa - Outono	118
4.5.3 Umidade relativa - Primavera	121
4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO E DIRETRIZES PARA A NBR 15.575	126
4.6.1 Desempenho Térmico Comparativo (Temperatura)	127
4.6.2 Desempenho Higrotérmico Comparativo (Umidade)	128
4.6.3 Diretrizes Sugeridas para a Adequação da NBR 15.575 Wood Frame	128
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	132
REFERÊNCIAS	133

1 INTRODUÇÃO

A busca por construções sustentáveis e eficientes em termos energéticos tem sido uma das principais preocupações da sociedade contemporânea. Nesse contexto, a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 surge como um importante instrumento regulatório no Brasil, estabelecendo requisitos e critérios para avaliar o desempenho de edificações.

A presente tese de doutorado tem como objetivo principal realizar uma comparação entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, no que se refere à conformidade com a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575, bem como investigar estratégias para a melhoria do conforto térmico.

A Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575, instituída no ano de 2013, estabelece critérios técnicos para a avaliação do desempenho de sistemas e componentes construtivos de edificações. Ela aborda diferentes aspectos, tais como segurança estrutural, segurança contra incêndio, durabilidade, conforto térmico, acústico e lumínico, além da eficiência energética e sustentabilidade.

No entanto, é importante considerar que a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 não diferencia especificamente entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, o que abre espaço para investigar se existem diferenças significativas no atendimento aos requisitos da norma entre esses dois tipos de construção.

Além disso, a busca por estratégias para melhorar o conforto térmico. A adoção de soluções construtivas sustentáveis, como o sistema construtivo em Wood Frame, pode proporcionar benefícios nesses aspectos, mas é necessário realizar uma análise comparativa com as edificações convencionais para verificar a efetividade dessas estratégias.

Portanto, esta pesquisa visa preencher uma lacuna na literatura científica, contribuindo para uma melhor compreensão da aplicação da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 em diferentes tipos de construção, bem como investigar e propor estratégias para aprimorar o conforto térmico nas edificações em estudo.

A partir dessa investigação, espera-se fornecer subsídios para a tomada de decisões no processo de projeto e construção, tanto para profissionais da área da

construção civil quanto para gestores públicos e demais agentes envolvidos no desenvolvimento sustentável do setor.

Dessa forma, a comparação entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame no que tange à Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 e às estratégias para conforto térmico, apresenta uma relevância significativa no atual contexto socioambiental e contribui para a busca por soluções mais sustentáveis e eficientes no setor da construção civil.

1.1 JUSTIFICATIVA

A busca por soluções sustentáveis e eficientes no setor da construção civil tem se tornado uma prioridade global, impulsionada pelas preocupações ambientais, escassez de recursos naturais e demandas por edificações mais confortáveis e econômicas. Nesse contexto, a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 surgiu como um importante instrumento regulatório no Brasil, estabelecendo critérios e requisitos para avaliar o desempenho de edificações em diferentes aspectos.

No entanto, embora a norma seja aplicável a diversos tipos de construções, ainda há lacunas em relação à análise comparativa entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame no que se refere ao atendimento aos requisitos estabelecidos pela Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575. Essa lacuna representa uma oportunidade de pesquisa relevante e atual, uma vez que o sistema construtivo em Wood Frame tem ganhado cada vez mais espaço no mercado devido às suas vantagens em termos de sustentabilidade, eficiência e conforto térmico.

A comparação entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, em relação à conformidade com a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575, permitirá identificar possíveis divergências e deficiências em ambos os sistemas construtivos, além de avaliar as estratégias mais eficazes para atender aos requisitos da norma. Essa análise comparativa é fundamental para o aprimoramento das diretrizes normativas e para a orientação de projetistas, construtores e gestores na tomada de decisões relacionadas à escolha do sistema construtivo mais adequado.

Outro aspecto relevante que será abordado nesta tese de doutorado é a investigação de estratégias para o conforto térmico e a obtenção de créditos de

carbono nas edificações convencionais e em Wood Frame. A busca por soluções que promovam o conforto térmico dos ocupantes, bem como a redução das emissões de carbono, é essencial para o desenvolvimento sustentável do setor da construção civil. A compreensão dessas estratégias e sua efetividade em diferentes sistemas construtivos contribuirá para o avanço do conhecimento e para a adoção de práticas mais sustentáveis no setor.

Portanto, esta pesquisa se justifica pela necessidade de preencher lacunas na literatura científica relacionadas à comparação entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame no que se refere à Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575, bem como pela importância de investigar e propor estratégias para o conforto térmico. Os resultados obtidos poderão fornecer subsídios práticos e científicos para a melhoria do desempenho das edificações e para a adoção de práticas mais sustentáveis no setor da construção civil.

1.2 OBJETIVOS

Esta tese de doutorado tem como objetivo principal realizar uma comparação da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, com foco no conforto térmico. Para alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos serão abordados:

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é realizar uma comparação abrangente da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, edificações já existentes, ou seja, pós ocupação, considerando o conforto térmico a fim de identificar diferenças significativas no atendimento aos requisitos normativos e propor estratégias para melhorar o desempenho dessas construções em termos de eficiência energética, sustentabilidade e conforto ambiental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar e comparar o atendimento aos requisitos da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 em edificações convencionais e em edificações em Wood Frame, identificando possíveis divergências e deficiências em cada sistema construtivo.
- Comparar o desempenho energético das edificações convencionais e em Wood Frame, considerando indicadores como consumo de energia, demanda térmica e eficiência dos sistemas de climatização.
- Identificar os principais desafios e benefícios associados à implementação da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 em edificações convencionais e em Wood Frame, com ênfase nas questões relacionadas ao conforto térmico e à sustentabilidade.

1.3 METODOLOGIA

A presente tese foi desenvolvida a partir de uma abordagem quantitativa e comparativa, configurada como um estudo de pós-ocupação com um delineamento de amostras pareadas. Este desenho metodológico foi escolhido para isolar o impacto do sistema construtivo no desempenho higrotérmico, garantindo a validade da comparação. Para tal, foram selecionadas duas unidades habitacionais reais, análogas em localização e orientação solar (fachada Oeste): uma edificada em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e outra em Wood Frame. A fase experimental foi embasada por uma extensa revisão da literatura sobre a NBR 15.575, conforto térmico e as características de cada sistema construtivo.

Para a coleta de dados, foi implementado um sistema de monitoramento totalmente automatizado, desenvolvido especificamente para esta pesquisa. Em cada protótipo, foram instalados sensores termo-higrométricos para medir a temperatura e a umidade relativa, tanto no ambiente interno quanto no externo. O sistema foi orquestrado por um microcontrolador Arduino, e a precisão temporal dos registros foi garantida por um Módulo de Relógio de Tempo Real (RTC). As medições foram realizadas de forma contínua em intervalos de uma hora, durante períodos representativos de cada uma das quatro estações do ano, a fim de capturar a performance dos sistemas sob um espectro variado de condições climáticas.

O tratamento dos dados coletados foi executado com o auxílio de softwares estatísticos. Inicialmente, foi realizada uma análise descritiva para calcular métricas como média, mediana, desvio padrão e amplitude térmica, permitindo caracterizar e comparar o comportamento geral de cada sistema. Em seguida, para validar as diferenças observadas, foi aplicada a estatística inferencial por meio do Teste t para amostras pareadas, determinando a significância estatística dos resultados ($p < 0,05$). Adicionalmente, empregou-se a análise de regressão linear para avaliar a correlação entre as temperaturas internas e as flutuações externas, quantificando a capacidade de isolamento e estabilidade de cada envoltória.

Finalmente, com base na análise comparativa e nos resultados estatísticos, o desempenho de cada edificação foi confrontado com os critérios estabelecidos pela Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575. A partir das lacunas e oportunidades identificadas, foram elaboradas estratégias para o aprimoramento do conforto térmico e propostas diretrizes para a evolução da normativa, com foco especial nos desafios e potencialidades de sistemas construtivos leves e industrializados, como o Wood Frame.

Com o problema de pesquisa, os objetivos e a metodologia devidamente delineados, o próximo passo consiste em aprofundar o embasamento teórico que sustenta esta investigação. O capítulo a seguir apresentará uma Revisão de Literatura detalhada, abordando os conceitos fundamentais de conforto térmico, as especificidades da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 e, crucialmente, as características, vantagens e desafios de cada um dos sistemas construtivos em análise: a Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o Wood Frame. Esta fundamentação teórica será a lente através da qual os resultados empíricos serão posteriormente analisados e interpretados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Essa revisão de literatura teve como objetivo fornecer um embasamento teórico sólido e identificar lacunas de conhecimento existentes, além de orientar o desenvolvimento da pesquisa e fornecer subsídios para a proposição de estratégias eficazes na comparação da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 entre edificações convencionais e edificações em Wood Frame, visando o conforto térmico e a redução de emissões de carbono. Aprofundando a discussão sobre as estratégias para o conforto térmico, os princípios do design passivo, como detalhado por Gurgel (2012), mostraram-se fundamentais. Essas estratégias foram além do simples isolamento, abrangendo a orientação solar da edificação, o sombreamento de aberturas, a ventilação cruzada e o uso inteligente da inércia térmica dos materiais. Para a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, a alta inércia térmica da alvenaria podia ser uma vantagem em climas com grande amplitude térmica diária. Já no sistema Wood Frame, a baixa inércia térmica exigia um projeto mais focado em isolamento e barreiras de radiação, mas permitia um controle mais rápido da temperatura interna através de sistemas de climatização, o que evidenciava a necessidade de estratégias de projeto distintas para cada sistema construtivo a fim de atender aos requisitos da NBR 15.575.

A análise comparativa entre os sistemas construtivos ganhou maior profundidade quando se considerou o ciclo de vida completo das edificações, um conceito explorado por Oliveira (2016). A avaliação não devia se limitar ao desempenho durante a fase de uso, mas também abranger a energia e o carbono embutidos nos materiais, desde a extração, passando pela fabricação e transporte, até a demolição e descarte. Nesse quesito, o Wood Frame apresentava uma vantagem substancial, pois a madeira, sendo um recurso renovável e de menor processamento energético, carregava uma pegada de carbono significativamente menor em comparação ao cimento e ao aço, componentes essenciais da construção convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. Esta abordagem de ciclo de vida foi crucial para uma avaliação justa da sustentabilidade.

O estudo de Alves e Ponciano (2018), ao comparar a viabilidade entre Wood Frame e alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico especificamente para o contexto brasileiro, reforçou que a escolha do sistema construtivo transcendia

o aspecto técnico, envolvendo fatores econômicos e logísticos. Os autores destacaram que, embora a alvenaria fosse consolidada e tivesse uma cadeia de suprimentos bem estabelecida, o Wood Frame se sobressaía pela velocidade de execução e pela redução significativa de resíduos no canteiro de obras. Essa eficiência construtiva não apenas impactava o custo final e o cronograma do projeto, mas também contribuía para um menor impacto ambiental, alinhando-se aos princípios de sustentabilidade que a NBR 15.575 visava promover indiretamente através de seus critérios de desempenho.

Um dos benefícios mais significativos do sistema Wood Frame, conforme apontado por Prazeres, Alberti e Arakawa (2022), foi sua capacidade intrínseca de atuar como um estoque de carbono. A madeira utilizada na estrutura sequestrava dióxido de carbono da atmosfera durante o crescimento da árvore e o mantinha armazenado ao longo de toda a vida útil da edificação. Este fenômeno, conhecido como sequestro de carbono, posicionava a construção em madeira como uma estratégia proativa de mitigação das mudanças climáticas, contrastando com a construção convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, cuja produção de cimento era uma das maiores fontes industriais de emissão de CO₂. Essa característica foi um diferencial competitivo chave na busca por edificações mais sustentáveis e na valorização de projetos através de mecanismos de crédito de carbono.

Apesar das vantagens técnicas e ambientais, a difusão da construção em madeira no Brasil, como abordado por Shigue (2018), enfrentava desafios culturais e a necessidade de qualificação da mão de obra. A forte tradição da construção em alvenaria no país criava uma barreira de aceitação no mercado, que muitas vezes associava a robustez e durabilidade exclusivamente a estruturas de concreto e tijolos. Superar essa percepção exigia não apenas a disseminação de informação técnica sobre o desempenho e a durabilidade do sistema Wood Frame, validados por normas como a ABNT NBR 15.575, mas também o investimento na capacitação de projetistas e construtores para garantir a correta aplicação e a qualidade final das edificações.

A Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 foi um importante documento técnico que estabeleceu critérios e requisitos para o desempenho de edificações habitacionais no Brasil. A seguir, apresentei uma revisão da literatura que destaca algumas contribuições relevantes sobre essa norma: Segundo Oliveira e Bittencourt

(2016), a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 foi uma importante evolução no cenário da construção civil brasileira, pois estabeleceu parâmetros técnicos que deviam ser seguidos para garantir a qualidade, segurança e conforto das edificações habitacionais. De acordo com Ferreira et al. (2018), a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 foi desenvolvida com o objetivo de fornecer critérios e requisitos claros e objetivos para o desempenho das edificações, abrangendo aspectos como estrutura, segurança contra incêndio, desempenho térmico e acústico, entre outros.

Em seu estudo, Silva et al. (2019) realizaram uma análise da aplicabilidade da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 em diferentes sistemas construtivos, incluindo alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, concreto pré-moldado e sistemas industrializados. Os autores concluíram que a norma era um importante instrumento de regulamentação, mas destacaram a necessidade de ajustes e aprimoramentos para melhor adequação aos sistemas construtivos. Segundo Lima e Souza (2020), a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 também desempenhou um papel fundamental no contexto da sustentabilidade nas edificações, uma vez que estabelecia critérios relacionados ao desempenho energético, uso racional de recursos naturais e qualidade ambiental interna. A importância da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 para a garantia da qualidade das edificações foi ressaltada por Santos e Ribeiro (2021), que destacaram que o cumprimento dos requisitos estabelecidos na norma contribuía para a melhoria da satisfação dos usuários, a redução de custos de manutenção e a valorização do imóvel.

Essas citações demonstraram a relevância da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 no contexto da construção civil brasileira, sendo um instrumento normativo que estabeleceu critérios técnicos para as edificações habitacionais, abrangendo aspectos como segurança, conforto e sustentabilidade. A norma foi objeto de estudos e análises para melhor compreensão de sua aplicabilidade e aprimoramentos, buscando sempre a qualidade e a eficiência das edificações.

2.1 TEORIAS E MODELOS DE CONFORTO TÉRMICO

A compreensão do conforto térmico em edificações transcende a mera medição de temperatura, constituindo-se como um fenômeno complexo que articula

a fisiologia humana, as condições físicas do ambiente e as dimensões psicológicas e comportamentais do indivíduo. Conforme estabelecido pela ASHRAE Standard 55 (2020), o conforto térmico é definido como "o estado da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico". Esta definição sublinha sua natureza subjetiva e a necessidade de abordagens que vão além de simples parâmetros prescritivos. Historicamente, a avaliação e a predição desse estado mental foram dominadas por dois paradigmas principais e, por vezes, concorrentes: o modelo de balanço de calor estático e o modelo de conforto adaptativo. A escolha entre estes modelos não é trivial, pois ela define a própria filosofia de projeto, influenciando diretamente as estratégias de climatização, a concepção da envoltória e a interação esperada entre o ocupante e o edifício.

2.1.1 O modelo estático de balanço de calor (PMV/PPD de Fanger)

O modelo estático, consolidado nos estudos seminais de P.O. Fanger (1970), representa a abordagem pioneira e mais influente para a quantificação do conforto térmico. Desenvolvido a partir de experimentos rigorosos em câmaras climáticas controladas, o modelo postula que a sensação de conforto de um indivíduo pode ser predita analisando-se o balanço energético de seu corpo. A premissa central é que a satisfação térmica é alcançada quando a produção de calor interno do corpo é equilibrada com suas perdas para o ambiente, mantendo uma temperatura corporal estável sem a necessidade de esforço fisiológico de termorregulação. Este arcabouço deu origem ao Voto Médio Predito (PMV - Predicted Mean Vote) e ao Percentual Previsto de Insatisfeitos (PPD - Predicted Percentage of Dissatisfied), métricas que se tornaram a base de normas internacionais como a ISO 7730.

O cálculo do PMV integra seis variáveis-chave, sendo duas relativas ao ocupante — a taxa metabólica (atividade física) e o isolamento do vestuário (roupa) — e quatro relativas ao ambiente: a temperatura do ar, a temperatura radiante média, a velocidade do ar e a umidade relativa. O resultado é um índice em uma escala de sete pontos, de -3 (muito frio) a +3 (muito quente), onde o zero representa a neutralidade térmica. O PPD, por sua vez, é derivado diretamente do PMV, estabelecendo uma relação quantitativa entre o afastamento da neutralidade e a porcentagem de pessoas que se sentiriam desconfortáveis. Esta abordagem

quantitativa foi fundamental para a engenharia de sistemas de aquecimento, ventilação e ar-condicionado (AVAC), pois forneceu metas claras e mensuráveis para o projeto de ambientes climatizados artificialmente.

A hegemonia do modelo PMV/PPD no século XX é inquestionável, sendo ele a espinha dorsal para o projeto de edifícios de escritórios e residenciais que dependem de sistemas mecânicos para manter condições internas estáveis e homogêneas. A sua lógica determinística, que trata o ser humano como um sensor passivo em um ambiente controlado, alinhava-se perfeitamente a uma arquitetura que buscava a independência das condições climáticas externas. Contudo, foi justamente essa premissa que começou a ser questionada a partir de extensos estudos de campo.

Pesquisas realizadas em edificações com ventilação natural, especialmente em climas tropicais e temperados, começaram a revelar uma discrepância significativa entre o conforto predito pelo modelo PMV e o conforto real reportado pelos ocupantes. Autores como de Dear e Brager (1998) e, posteriormente, Nicol e Humphreys (2002), demonstraram que as pessoas em edifícios ventilados naturalmente não apenas toleravam, mas frequentemente preferiam, uma gama de temperaturas muito mais ampla do que aquela considerada aceitável pelo modelo estático. Esta constatação evidenciou que os fatores comportamentais, fisiológicos e psicológicos, largamente ignorados no laboratório, desempenhavam um papel crucial na determinação do conforto em ambientes do mundo real, abrindo caminho para um novo paradigma.

2.1.2 O modelo de conforto adaptativo

Em resposta direta às limitações do modelo estático, surgiu o modelo de conforto adaptativo. Sua premissa fundamental, conforme articulado por de Dear e Brager (1998), é que "se uma mudança produz desconforto, as pessoas reagem de maneiras que tendem a restaurar seu conforto". Esta abordagem reconhece o ocupante como um agente ativo, capaz de se adaptar ao seu ambiente térmico através de uma série de ajustes. O conforto, portanto, deixa de ser um conjunto fixo de condições a ser imposto e passa a ser um equilíbrio dinâmico alcançado através da interação entre o indivíduo, o edifício e o clima externo.

Os mecanismos de adaptação são tipicamente categorizados em três níveis. A adaptação comportamental é a mais imediata, incluindo ações como ajustar a vestimenta, abrir ou fechar janelas, usar ventiladores ou persianas, mudar de lugar ou alterar o ritmo de atividades. A adaptação fisiológica refere-se à aclimação do corpo humano ao longo do tempo a determinadas condições climáticas, alterando a resposta termorregulatória. Por fim, a adaptação psicológica envolve a alteração das expectativas de conforto com base no contexto; por exemplo, um indivíduo espera e aceita temperaturas mais elevadas em um dia quente de verão do que em um dia ameno de primavera, especialmente se tiver controle sobre o seu ambiente.

Diferentemente do modelo PMV, a implementação prática do modelo adaptativo é empiricamente derivada de estudos de campo e, em vez de depender de seis variáveis complexas, correlaciona a temperatura interna de conforto diretamente com a temperatura externa média. A lógica é simples: as condições externas moldam as expectativas e comportamentos dos ocupantes. Esta abordagem foi formalmente incorporada em normas como a ASHRAE 55 e a EN 16798-1, mas sua aplicação é restrita a edificações operadas sem climatização mecânica. Sua formulação, tipicamente uma equação de regressão linear, define uma zona de conforto dinâmica que varia ao longo do ano, em contraste com a faixa estática proposta pelo modelo PMV.

O debate contemporâneo sobre conforto térmico não busca mais suplantiar um modelo pelo outro, mas sim entender seus domínios de aplicação. Como apontam estudos recentes sobre edifícios de "modo misto" (Mixed-Mode Buildings), que alternam entre ventilação natural e ar-condicionado, a complexidade moderna exige uma abordagem híbrida (Parkinson et al., 2020). Nestes casos, o modelo adaptativo é mais adequado quando as janelas estão abertas e o ar-condicionado desligado, enquanto o modelo PMV/PPD torna-se mais relevante quando o sistema mecânico está em operação.

A compreensão crítica dessa dicotomia teórica é, portanto, fundamental para a presente tese. A análise comparativa entre a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico de alta inércia térmica e a edificação em Wood Frame de baixa inércia será profundamente influenciada pela escolha do modelo de avaliação. O sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico pode se beneficiar do amortecimento térmico em uma análise adaptativa, enquanto o Wood Frame, com

sua resposta rápida, pode ser mais facilmente controlado por sistemas AVAC avaliados pelo PMV. A análise dos resultados à luz de ambos os modelos teóricos permitirá uma interpretação mais rica e nuançada do real desempenho de cada sistema construtivo, revelando não apenas qual é "melhor", mas em qual contexto e sob qual filosofia de conforto cada um se destaca.

2.2 CONCEITOS E REQUISITOS DA NORMA

A Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 representa um marco regulatório para a construção civil brasileira, estabelecendo critérios e requisitos para o desempenho de edificações habitacionais. A sua abordagem foca em diversos aspectos relacionados à segurança, conforto e sustentabilidade, tendo como objetivo primordial definir os parâmetros mínimos de desempenho para garantir a qualidade das moradias e o bem-estar dos seus usuários (OLIVEIRA; BITTENCOURT, 2016).

Um dos avanços mais significativos trazidos pela norma foi a instauração de um paradigma de desempenho, em detrimento do modelo prescritivo anteriormente dominante. Isso significa que, em vez de ditar quais materiais e técnicas devem ser utilizados, a norma estabelece os resultados que os sistemas construtivos devem alcançar. Essa mudança incumbe a projetistas e construtores a responsabilidade de comprovar que suas soluções atendem aos níveis de desempenho-alvo, incentivando a inovação tecnológica e a busca por soluções mais eficientes e adequadas às necessidades do usuário final, o que contribui diretamente para a elevação da qualidade geral das construções habitacionais (CARVALHO, et al., 2018).

2.2.1 A transição de normas prescritivas para normas de desempenho

O arcabouço regulatório da construção civil em escala global tem passado por uma profunda transformação nas últimas décadas, marcada pela transição de um modelo predominantemente prescritivo para um orientado ao desempenho. Normas prescritivas, caracterizadas por sua abordagem de "receita de bolo" (cookbook approach), ditam os meios para se atingir um resultado, especificando materiais,

dimensões e técnicas construtivas que devem ser empregados. Sua principal vantagem reside na simplicidade de aplicação e verificação, oferecendo um caminho claro e de baixo risco para construtores e agentes de fiscalização, onde o cumprimento da "receita" é sinônimo de conformidade legal.

Contudo, a principal e mais criticada limitação do modelo prescritivo é sua inerente rigidez, que atua como uma barreira à inovação tecnológica e à otimização de sistemas. Ao focar no "como" em detrimento do "porquê", tais normas desencorajam a pesquisa e o desenvolvimento de novos materiais e soluções construtivas que poderiam alcançar resultados superiores com maior eficiência de recursos. Em um cenário de crescente demanda por sustentabilidade, eficiência energética e resiliência, a abordagem prescritiva mostrou-se inadequada para responder aos complexos desafios do século XXI, motivando a busca por um novo paradigma regulatório.

Em contraposição, às normas baseadas em desempenho estabelecem os resultados finais que um edifício ou seus componentes devem alcançar, focando em critérios objetivos e mensuráveis relacionados à segurança, habitabilidade e durabilidade. Em vez de ditar a espessura de uma parede, uma norma de desempenho define, por exemplo, o nível mínimo de isolamento térmico e acústico que essa parede deve proporcionar. Essa mudança fundamental de foco do "meio" para o "fim" transfere a responsabilidade da solução técnica para os projetistas e construtores, conferindo-lhes a liberdade para inovar e selecionar a combinação de materiais e tecnologias mais adequada para atingir as metas de desempenho estipuladas.

No Brasil, a publicação da ABNT NBR 15.575 em 2013 representou o marco definitivo dessa transição paradigmática. Conhecida como Norma de Desempenho, ela estabeleceu pela primeira vez um conjunto abrangente de requisitos quantitativos e qualitativos para os sistemas que compõem uma edificação habitacional — incluindo estrutura, pisos, vedações, coberturas e instalações. Ao definir critérios para o desempenho térmico, acústico, lumínico, estrutural e de segurança ao fogo, a norma efetivamente deslocou o eixo da indústria de uma cultura de conformidade prescritiva para uma cultura de comprovação de resultados.

Essa abordagem de desempenho é intrinsecamente centrada no usuário final e no ciclo de vida da edificação. O conceito de Vida Útil de Projeto (VUP), um dos

pilares da NBR 15.575, exemplifica essa nova filosofia, exigindo que os sistemas mantenham sua performance por um período de tempo determinado, condicionando isso a um plano de manutenção adequado. Com isso, a responsabilidade da cadeia produtiva não se encerra na entrega da obra, mas se estende ao longo de sua vida útil, promovendo uma maior preocupação com a durabilidade dos materiais e a qualidade da construção, em benefício direto do consumidor.

2.2.2 Implicações para a inovação e os desafios técnicos na construção civil

A principal virtude e implicação positiva da adoção de um código de desempenho é o fomento à inovação. Ao abrir mão das amarras prescritivas, a NBR 15.575 cria um ambiente propício para a competição tecnológica, onde o mercado é incentivado a desenvolver e adotar sistemas construtivos mais eficientes, materiais de alta performance e soluções de projeto mais inteligentes. Sistemas não convencionais, como o Wood Frame, que antes enfrentavam barreiras para sua aceitação por não se encaixarem nas "receitas" tradicionais, passam a ser avaliados por seu mérito e sua capacidade de atender (ou superar) os critérios de desempenho, sendo colocados em pé de igualdade com os sistemas consolidados.

Entretanto, a liberdade de inovar vem acompanhada do ônus da prova. A mais significativa implicação técnica das normas de desempenho é a necessidade de verificação e comprovação dos resultados. A conformidade não é mais uma simples questão de checar uma lista de especificações, mas exige a realização de ensaios laboratoriais, simulações computacionais e avaliações técnicas especializadas para demonstrar que a solução proposta de fato atinge os níveis de desempenho exigidos. Esse processo, apontado por diversos pesquisadores do setor (John & Oliveira, 2017), é consideravelmente mais complexo e oneroso do que a verificação prescritiva.

Essa nova demanda por comprovação técnica expôs desafios estruturais na construção civil brasileira. A carência de laboratórios acreditados em diversas regiões do país, o alto custo dos ensaios e a falta de uma cultura de simulação de desempenho consolidada emergiram como barreiras significativas à plena implementação da norma. Além disso, a transição exigiu uma profunda capacitação do capital humano, demandando que arquitetos, engenheiros e construtores

adquiriram novas competências em áreas como física das edificações, acústica e ciência dos materiais para poderem projetar e executar edificações em conformidade.

Outra implicação crucial é a reconfiguração da cadeia de responsabilidades. Sob um regime prescritivo, a responsabilidade era difusa e muitas vezes atribuída ao próprio código. Com a NBR 15.575, a responsabilidade pelo desempenho final da edificação é claramente atribuída aos diversos agentes da cadeia produtiva, desde os fabricantes de materiais e projetistas até os construtores e incorporadores. Essa mudança acarreta uma nova gestão de riscos, incentivando uma maior integração entre as equipes e um controle de qualidade muito mais rigoroso em todas as etapas do processo construtivo.

Em suma, a transição para um modelo baseado em desempenho, materializada pela NBR 15.575, é um processo dialético. Se por um lado ela representa uma poderosa alavanca para a modernização, inovação e melhoria da qualidade das edificações no Brasil, por outro, impõe desafios técnicos, financeiros e educacionais que a indústria ainda trabalha para superar. É precisamente neste contexto de tensão entre o potencial inovador e os desafios de comprovação que a presente tese se insere, utilizando a comparação entre um sistema tradicional e um sistema industrializado para explorar, na prática, as implicações e oportunidades geradas por este novo paradigma.

No que tange ao conforto térmico, a NBR 15.575 estabelece requisitos detalhados para a manutenção de uma temperatura interna adequada, o uso de isolamento térmico, a proteção contra o ganho excessivo de calor e a garantia de ventilação apropriada. Tais exigências são contextualizadas de acordo com as diferentes zonas bioclimáticas do Brasil, garantindo que as soluções de projeto sejam adaptadas às condições climáticas locais. A norma, portanto, força uma análise criteriosa da envoltória da edificação, incluindo paredes, coberturas e aberturas, para assegurar o conforto dos ocupantes de maneira passiva, antes mesmo da consideração de sistemas de climatização artificial (SILVA et al., 2019).

Aprofundando a questão térmica, a aplicação da norma exige uma compreensão dos princípios de design passivo, que visam otimizar o desempenho da edificação através de estratégias de projeto inteligentes. A orientação solar, o dimensionamento e a proteção das aberturas, a ventilação cruzada e o uso

adequado da inércia térmica dos materiais são elementos cruciais para atender aos requisitos. A escolha de materiais com propriedades térmicas adequadas, como transmitância e absorvância solar, torna-se uma decisão de projeto fundamental para garantir que as temperaturas internas permaneçam dentro da zona de conforto, reduzindo a dependência de sistemas mecânicos e melhorando a eficiência energética global da habitação (GURGEL, 2012).

Em relação à segurança estrutural, a norma define requisitos mínimos para garantir a resistência e a estabilidade das edificações. O objetivo é assegurar que as estruturas resistam às cargas e ações previsíveis durante sua vida útil, proporcionando condições seguras para os ocupantes. Para isso, são abordados aspectos como o dimensionamento adequado dos elementos, a verificação da capacidade de carga, a estabilidade das fundações e a proteção contra agentes externos, como vento e sismos. Ao estabelecer esses critérios, a norma busca mitigar os riscos de colapso estrutural, elevando o padrão de segurança das construções no país (FERREIRA et al., 2018).

O desempenho acústico é outro pilar fundamental da NBR 15.575, que visa proporcionar ambientes internos confortáveis e protegidos de ruídos excessivos. Os requisitos abrangem tanto o isolamento a ruídos aéreos de fontes externas, como o tráfego, quanto o isolamento entre unidades habitacionais distintas. Além disso, a norma trata da limitação de ruídos de impacto em pisos e do controle de ruídos gerados por equipamentos e instalações hidrossanitárias. Ao definir critérios para o isolamento acústico de paredes, pisos e coberturas, busca-se promover um ambiente interno mais saudável e tranquilo, impactando positivamente a qualidade de vida dos moradores (LIMA; SOUZA, 2020).

A durabilidade dos sistemas construtivos é extensivamente tratada, com o objetivo de garantir que as edificações se mantenham funcionais, seguras e esteticamente adequadas ao longo do tempo. Para tal, a norma introduz o conceito de Vida Útil de Projeto (VUP), que corresponde ao período estimado para o qual um sistema é projetado a fim de atender aos requisitos de desempenho, desde que submetido a um plano de manutenção adequado. Isso exige a seleção de materiais duráveis, a proteção contra agentes como umidade e radiação solar, e a execução correta dos sistemas. Consequentemente, a norma também obriga a elaboração e entrega de um manual de uso, operação e manutenção ao proprietário, fomentando

uma cultura de conservação predial e contribuindo para a valorização do imóvel a longo prazo (SANTOS; RIBEIRO, 2021).

A implementação da NBR 15.575, contudo, impôs desafios significativos para o setor. A necessidade de ensaios laboratoriais para comprovação do desempenho, a falta de laboratórios capacitados em algumas regiões e a carência de mão de obra qualificada para executar os sistemas de acordo com os novos padrões representaram obstáculos iniciais. Além disso, a mudança para uma cultura de projeto baseada em desempenho exigiu uma curva de aprendizado para profissionais e empresas, impactando os custos e processos. Apesar disso, a norma tem sido um catalisador para a modernização e o aprimoramento técnico da construção civil brasileira (ALVES; PONCIANO, 2018).

Em suma, a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 estabelece um conjunto robusto de critérios que visam garantir a segurança, o conforto e a durabilidade das edificações habitacionais. Ao abranger aspectos cruciais como desempenho estrutural, térmico, acústico e a vida útil dos materiais, a norma promove uma melhoria substancial na qualidade das construções e foca diretamente no bem-estar dos usuários, tornando a comparação de seu atendimento entre diferentes sistemas construtivos, como o convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o Wood Frame, um campo de estudo de grande relevância.

2.2.3 Impacto na construção de edificações

A Norma de Desempenho ABNT NBR 15575 representa um divisor de águas para a construção de edificações habitacionais no Brasil, estabelecendo um novo patamar de critérios e requisitos para garantir a qualidade, a segurança e o desempenho das construções ao longo de sua vida útil. A sua implementação e os seus efeitos na indústria da construção civil têm sido objeto de diversos estudos, que analisam a profundidade de sua influência no setor.

O principal impacto da NBR 15575 reside na mudança de paradigma que promove: a transição de um modelo puramente prescritivo para uma abordagem focada no desempenho. Isso significa que a responsabilidade é transferida para projetistas e construtores, que devem comprovar, por meio de simulações, ensaios ou outros métodos, que os sistemas construtivos escolhidos atendem aos níveis de desempenho exigidos. Essa abordagem não apenas eleva a qualidade das edificações, mas também fomenta a inovação e a busca por soluções técnicas mais eficientes e adequadas às necessidades do usuário final (Carvalho, et al., 2018).

No que se refere à qualidade e durabilidade, a norma influencia positivamente ao estabelecer critérios técnicos claros e introduzir o conceito de Vida Útil de Projeto (VUP). A exigência de especificar a durabilidade esperada para cada sistema (estruturas, vedações, coberturas) e de fornecer um manual de manutenção ao proprietário fomenta uma cultura de conservação e valorização patrimonial. Dessa forma, a norma não se limita à entrega da obra, mas estende a sua preocupação por toda a vida útil da edificação, visando reduzir falhas prematuras e custos de manutenção (Santos, et al., 2019).

A segurança das construções é um dos pilares de maior impacto da norma. Ao estabelecer requisitos mínimos de desempenho estrutural, a NBR 15575 promove ativamente a redução dos riscos de falhas e colapsos. Isso é alcançado através da exigência de projetos que garantam a resistência das edificações a todas as cargas e esforços previsíveis a que serão submetidas, desde o peso próprio e sobrecargas de uso até as ações do vento. Essa abordagem rigorosa contribui diretamente para a integridade física das construções e para a segurança de seus ocupantes (Silva, et al., 2020).

O impacto no conforto dos usuários é igualmente notável. A norma tem sido fundamental para a melhoria do desempenho térmico e acústico das edificações, estabelecendo critérios que visam proporcionar ambientes internos mais agradáveis e saudáveis. Ao fixar limites para a transmissão de calor e som através da envoltória, a norma impulsiona a adoção de melhores soluções de isolamento e esquadrias, resultando em espaços mais silenciosos e com maior estabilidade térmica, o que se traduz em bem-estar e qualidade de vida para os moradores (Lima, et al., 2019).

Além do produto final, a NBR 15575 impacta toda a cadeia produtiva e a prática profissional. A necessidade de comprovar o desempenho exige maior integração entre arquitetos, engenheiros, fornecedores de materiais e executores da obra. Essa integração força uma profissionalização do setor, onde as decisões de projeto devem ser baseadas em dados técnicos e análises criteriosas, garantindo que as construções sejam capazes de suportar as cargas e esforços para os quais foram projetadas, elevando o rigor técnico em todas as etapas do processo construtivo (Souza, et al., 2017).

Contudo, a implementação da norma também apresentou desafios consideráveis. A necessidade de realizar ensaios laboratoriais para validar o desempenho de novos sistemas gerou custos adicionais e expôs a carência de infraestrutura laboratorial em algumas regiões do país. Adicionalmente, a adequação dos processos construtivos e, principalmente, a capacitação da mão de obra para atender aos novos níveis de exigência e precisão na execução, representam barreiras que o setor ainda trabalha para superar, demandando investimento contínuo em treinamento e tecnologia (Alves; PONCIANO, 2018).

Em síntese, a Norma de Desempenho provocou uma profunda transformação na construção civil brasileira. Seu impacto se manifesta na elevação dos padrões de qualidade, segurança e conforto, ao mesmo tempo que estimula a inovação tecnológica e a profissionalização do setor. Embora os desafios de sua implementação sejam reais, os benefícios gerados para o consumidor final e para a qualificação da produção habitacional no país são inegáveis, consolidando a NBR 15.575 como um instrumento fundamental para o desenvolvimento da indústria.

Fica evidente, portanto, que a NBR 15.575 estabelece um novo paradigma focado no resultado final e no bem-estar do usuário, definindo "o que" a edificação deve alcançar em termos de segurança, conforto e durabilidade. Para compreender como esses requisitos se aplicam na prática, é fundamental analisar os sistemas construtivos sob a ótica da norma. A análise se inicia pelo sistema mais difundido no Brasil, a Edificação em Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, a fim de investigar como suas características intrínsecas respondem a esses novos critérios de desempenho.

2.3 EDIFICAÇÃO DE ALVENARIA CONVENCIONAL OU ALVENARIA DE BLOCO CERÂMICO

A edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, sistema construtivo predominante no cenário brasileiro, é caracterizada fundamentalmente por uma estrutura reticulada de concreto armado (pilares, vigas e lajes), que é responsável por absorver e distribuir todas as cargas da edificação, e por paredes de vedação, geralmente executadas com blocos cerâmicos ou de concreto. Neste método, a alvenaria tem a função primordial de fechamento dos vãos e compartimentação dos espaços internos, não possuindo, na maioria dos casos, função estrutural.

A edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, é definida por uma lógica estrutural específica geralmente, uma estrutura reticulada de concreto armado, composta por pilares, vigas e lajes, que é responsável por resistir e distribuir todas as cargas da edificação até as fundações. Neste sistema, as paredes, geralmente executadas com blocos cerâmicos ou de concreto, desempenham a função primordial de vedação, ou seja, de fechamento dos vãos e compartimentação dos espaços internos, não possuindo, na maioria dos casos, função estrutural (Cunha et al., 2018).

A hegemonia deste sistema no Brasil remonta à modernização da construção civil no século XX, impulsionada pela industrialização e pela ampla disponibilidade de seus insumos básicos: cimento, areia, brita e aço. A disseminação do concreto armado, uma tecnologia que permitiu a verticalização das cidades, consolidou este método como o padrão de mercado. Sua lógica construtiva, embora artesanal, tornou-se amplamente dominada pela mão de obra local, criando uma cadeia produtiva robusta e familiar para engenheiros, arquitetos e construtores em todo o país (Oliveira et al., 2016).

O funcionamento do sistema se dá em etapas sequenciais e interdependentes. Após a execução das fundações, a estrutura de concreto armado é moldada "in loco", em um processo que envolve a montagem de fôrmas de madeira, o posicionamento das armaduras de aço e a concretagem. Somente após a cura e a desforma da estrutura, as paredes de alvenaria são erguidas, assentadas com argamassa. Posteriormente, são executadas as instalações elétricas e

hidrossanitárias (muitas vezes com quebra das paredes já erguidas), seguidas pelos revestimentos (chapisco, emboço, reboco) e acabamentos. Este processo, classificado como "úmido" pelo uso intensivo de água e argamassas, é caracteristicamente linear e demorado (Gomes et al., 2019).

Apesar de sua ampla aceitação, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico enfrenta desafios significativos que têm motivado a busca por alternativas. O principal problema reside na sua baixa produtividade e longa duração. O processo artesanal e sequencial resulta em ciclos de construção mais longos e maior exposição a intempéries e incertezas do canteiro. Além disso, o método "úmido" gera um volume considerável de resíduos (entulho) e um alto consumo de recursos naturais, como água, areia e cimento, cuja produção tem um notável impacto ambiental (Chaves, 2018).

Outro desafio crítico é a dependência da qualificação da mão de obra. Como a execução é largamente manual, a precisão e a qualidade final da construção são altamente variáveis e difíceis de controlar. Falhas no processo, como frestas na alvenaria, falhas de prumo ou concretagem inadequada, podem comprometer drasticamente os desempenhos térmico, acústico e de estanqueidade, tornando o controle de qualidade um desafio constante no canteiro de obras (Souza et al., 2017). A falta de padronização nos componentes e processos também contribui para perdas de material e para a dificuldade de se garantir um desempenho consistente e previsível, um contraponto direto aos sistemas industrializados.

Uma das características mais notáveis do sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico é a sua percebida robustez e durabilidade, atributos amplamente consolidados na cultura construtiva nacional. A estrutura de concreto armado, quando bem projetada e executada, é capaz de resistir a elevadas cargas e à ação do tempo, garantindo a estabilidade e a segurança da edificação. Essa capacidade de suportar as cargas impostas ao longo do tempo é um dos pilares para o atendimento aos requisitos de segurança estrutural da ABNT NBR 15.575 (Cunha et al., 2018).

No que diz respeito ao desempenho térmico, as construções em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresentam, caracteristicamente, uma elevada inércia térmica devido à massa dos materiais empregados. Essa propriedade faz com que as paredes e lajes absorvam e liberem calor de forma

lenta, o que ajuda a amortecer as variações da temperatura externa ao longo do dia. Em climas com grande amplitude térmica diária, essa característica pode ser benéfica, contribuindo para a manutenção de temperaturas internas mais estáveis e reduzindo a necessidade de sistemas de climatização (Silva et al., 2017). O desempenho acústico é, frequentemente, outro ponto forte do sistema. A massa e a densidade dos elementos de alvenaria e concreto conferem um bom isolamento a ruídos aéreos, dificultando a propagação do som entre ambientes externos e internos, bem como entre unidades habitacionais adjacentes. Um bom projeto e uma execução cuidadosa, evitando frestas e falhas, resultam em um ambiente interno mais silencioso e protegido, um fator essencial para o conforto e o bem-estar dos moradores (Gomes et al., 2019).

Do ponto de vista construtivo, o sistema é conhecido por sua flexibilidade. Como a estrutura é independente das vedações, há uma grande liberdade para o layout arquitetônico e para futuras reformas que envolvam a remoção ou alteração de paredes internas, sem comprometer a integridade estrutural do edifício. Essa adaptabilidade é uma vantagem significativa, permitindo que o espaço seja reconfigurado para atender a novas necessidades dos usuários ao longo do tempo (Lima et al., 2018).

Apesar de suas qualidades e ampla aceitação, o sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico também apresenta desafios. O processo construtivo é classificado como "úmido", envolvendo o uso extensivo de água, cimento e argamassas, o que geralmente resulta em um canteiro de obras com maior geração de resíduos e menor controle de qualidade quando comparado a sistemas industrializados. Adicionalmente, o processo tende a ser mais lento e intensivo em mão de obra, fatores que podem impactar o cronograma e o custo final da construção (Oliveira et al., 2016).

Em conclusão, a edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico é um sistema construtivo robusto, durável e flexível, com bom desempenho acústico e potencial para um bom desempenho térmico devido à sua inércia. Sua predominância no mercado garante a disponibilidade de materiais e mão de obra. No entanto, seus desafios relacionados à velocidade de execução, geração de resíduos e dependência de processos artesanais no canteiro de obras motivam a

comparação com sistemas construtivos alternativos, como o Wood Frame, na busca por soluções cada vez mais eficientes e sustentáveis.

FIGURA 1 – Edificação Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico



FONTE: O autor (2023).

A vasta literatura acadêmica sobre a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico oferece um panorama detalhado de seu desempenho, abrangendo análises estruturais, eficiência energética, conforto termoacústico, durabilidade e segurança contra incêndio. Este robusto corpo de conhecimento serve como uma base essencial para estudos comparativos, que contrastam o método tradicional com sistemas construtivos inovadores para avaliar as vantagens e desvantagens de cada abordagem em contextos específicos.

A análise da durabilidade e do desempenho estrutural é um dos tópicos mais consolidados. A resistência intrínseca das estruturas de concreto armado, aliada à solidez da alvenaria, confere a essas edificações a capacidade de suportar as cargas e esforços previstos ao longo do tempo, um dos pilares da segurança construtiva, como aponta Cunha et al. (2018). No entanto, a pesquisa de Silva et al. (2018) ressalta que a longevidade não é inerente, mas sim uma consequência direta da qualidade da execução e da adoção de práticas de manutenção adequadas, destacando a necessidade de cuidados contínuos para garantir o desempenho esperado ao longo da vida útil.

No campo do desempenho térmico e da eficiência energética, estudos como o de Silva et al. (2017) demonstram que a elevada inércia térmica da alvenaria é uma

de suas principais vantagens, ajudando a regular a temperatura interna e a reduzir a necessidade de climatização artificial. Contudo, pesquisas mais recentes, a exemplo da análise de Li et al. (2019) em diferentes climas, evidenciam que a inércia, por si só, é insuficiente para garantir a eficiência energética. A otimização do desempenho térmico em edificações convencionais depende cada vez mais da integração de outras estratégias, como o uso de isolantes térmicos complementares, esquadrias de alto desempenho e projetos que favoreçam a ventilação natural.

O desempenho acústico, por sua vez, é frequentemente citado como um ponto forte do sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. A elevada massa dos componentes de concreto e alvenaria atua como uma barreira eficaz contra a transmissão de ruídos aéreos, um princípio conhecido como "lei da massa". Isso resulta em um ambiente interno mais silencioso e protegido de fontes sonoras externas, como o tráfego urbano, um benefício direto para o conforto e a qualidade de vida dos ocupantes, conforme destacado por Gomes et al. (2019).

Do ponto de vista do processo construtivo e dos custos, o sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresenta uma dualidade. Por um lado, por ser um método amplamente dominado pela indústria e com uma cadeia de suprimentos consolidada, seus custos diretos de materiais e mão de obra podem ser mais acessíveis. Por outro, o processo é mais lento, artesanal e intensivo em mão de obra quando comparado a sistemas pré-fabricados, além de gerar um volume maior de resíduos e consumir mais água no canteiro, fatores que impactam o custo total e o cronograma do empreendimento (Oliveira et al., 2016).

Um ponto crítico frequentemente abordado na literatura mais recente é o impacto ambiental associado ao sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. A produção de cimento, seu principal componente, é uma das atividades industriais mais intensivas em energia e uma fonte significativa de emissões de CO₂. Adicionalmente, o alto consumo de recursos naturais não renováveis, como areia e brita, e a grande geração de entulho na fase de construção e demolição, colocam o modelo tradicional em desvantagem sob a ótica da sustentabilidade, impulsionando a busca por alternativas de menor impacto (Chaves, 2018).

Fica evidente, portanto, que a literatura sobre a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico está em constante evolução. Embora seja um sistema profundamente estudado e compreendido, as pesquisas atuais concentram-se

concentram em aprimorar sua eficiência e mitigar seus impactos negativos. Os estudos buscam identificar oportunidades de melhoria nos métodos construtivos, avaliar a incorporação de novos materiais e tecnologias, e, fundamentalmente, analisar sua performance em comparação a sistemas alternativos que prometem maior sustentabilidade e eficiência, como o Wood Frame.

2.3.1 Características e desafios das construções no sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico

Uma das principais características é a flexibilidade arquitetônica e adaptabilidade. Como a alvenaria tem função apenas de vedação, sem comprometer a estrutura portante, há uma grande liberdade para a criação de layouts diversificados e para futuras reformas. Esta capacidade de modificação dos espaços internos ao longo da vida útil da edificação, como a remoção ou adição de paredes, é uma vantagem significativa para atender às mudanças nas necessidades dos usuários (Lima et al., 2018). A robustez e durabilidade são atributos culturalmente associados a este sistema. A combinação do concreto armado com a alvenaria confere uma elevada resistência mecânica e uma percepção de solidez. Quando bem projetada e executada, a estrutura é capaz de resistir às ações do tempo e às cargas de uso, garantindo uma longa vida útil à edificação, um fator crucial para a segurança e a valorização do patrimônio (Cunha et al., 2018).

Outra característica relevante é o seu desempenho termoacústico passivo. A elevada massa dos materiais empregados (concreto e blocos) resulta em uma alta inércia térmica, que ajuda a estabilizar a temperatura interna, e em um bom isolamento acústico pelo princípio da massa, dificultando a propagação de ruídos aéreos. Essas propriedades contribuem para o conforto dos ocupantes, um requisito central da ABNT NBR 15.575 (Gomes et al., 2019).

Apesar de suas qualidades, o sistema enfrenta desafios significativos, sendo o processo construtivo lento e artesanal um dos principais. A execução "in loco", que depende de múltiplas etapas como montagem de fôrmas, concretagem, cura, e assentamento da alvenaria, é um processo demorado e menos produtivo em comparação com métodos industrializados. Essa característica impacta diretamente os cronogramas e os custos indiretos da obra (Oliveira et al., 2016). A geração de

resíduos e o impacto ambiental são desafios crescentes. O método construtivo "úmido" e a baixa precisão dos processos artesanais resultam em um volume considerável de entulho, perdas de material (como argamassa e concreto) e alto consumo de recursos naturais, como água e areia. A pegada de carbono associada à produção de cimento, em particular, é um ponto crítico sob a ótica da sustentabilidade (Chaves, 2018).

A qualidade final da construção é altamente dependente da mão de obra. Como a execução é largamente manual, a qualificação e o cuidado dos profissionais envolvidos são determinantes para o desempenho da edificação. Falhas no processo, como frestas na alvenaria ou falhas na concretagem, podem comprometer drasticamente os desempenhos térmico, acústico e de estanqueidade, tornando o controle de qualidade um desafio constante no canteiro de obras (Souza et al., 2017).

O sistema construtivo convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, embora familiar e robusto, apresenta um contraponto entre suas características de flexibilidade e desempenho passivo e seus desafios relacionados à produtividade, sustentabilidade e dependência da qualidade da mão de obra. Essa dualidade justifica a crescente busca por sistemas alternativos que possam oferecer respostas mais eficientes a esses desafios.

Características das construções no sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico:

QUADRO 1 – Principais características do sistema convencional de construção

Vantagens e Desempenho	Flexibilidade e Adaptabilidade	Processo e Cronograma	Padronização e Qualidade	Mão de Obra e Qualificação
O sistema convencional de construção em alvenaria apresenta características	A construção no sistema convencional é conhecida por sua adaptabilidade	O processo construtivo no sistema convencional pode demandar	A falta de padronização nos processos e materiais utilizados nas construções	A construção no sistema convencional pode requerer mão de obra especializada

como resistência estrutural, durabilidade, bom desempenho acústico e facilidade de manutenção (Silva et al., 2017).	e flexibilidade, permitindo modificações e ampliações e futuras(Lima et al., 2018).	mais tempo em comparação com sistemas pré-fabricados , o que pode afetar os prazos de entrega dos projetos (Oliveira et al., 2016).	convencionais pode gerar variações de qualidade e desempenho" (Cunha et al., 2019).	e treinada, o que pode ser um desafio considerando a escassez de profissionais qualificados" (Gomes et al., 2020).
---	---	---	---	--

FONTE: Organizado pelo autor (2023).

2.3.2 Estratégias para conforto térmico e eficiência energética no sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico

A busca por construções mais sustentáveis e eficientes tem despertado um crescente interesse nos aspectos de conforto térmico e eficiência energética. No contexto do sistema de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, diversos estudos têm se concentrado em estratégias para otimizar o desempenho das edificações, visando não apenas o atendimento a normas, mas também a melhoria da qualidade de vida dos ocupantes e a redução do impacto ambiental associado ao consumo de energia.

O conforto térmico é um estado mental complexo que expressa a satisfação de um indivíduo com o ambiente térmico que o cerca, sendo uma condição fundamental para o bem-estar, a saúde e a produtividade (LIMA et al., 2019). Conforme definido pela ASHRAE (2005), essa percepção é eminentemente subjetiva, influenciada por uma combinação de fatores físicos (temperatura do ar, umidade, velocidade do ar e radiação), fisiológicos (nível de atividade e vestimenta) e psicológicos (expectativas e experiências prévias do indivíduo).

O desempenho térmico das edificações no Brasil é norteado pela ABNT NBR 15575, que estabelece parâmetros mínimos para a envoltória, como transmitância e

capacidade térmica, e para as aberturas, visando garantir condições básicas de conforto (ABNT, 2013). No entanto, como argumentam Kuchen e Fisch (2009), modelos de conforto adaptativo, que consideram a capacidade dos usuários de se ajustarem às condições locais, são mais representativos da realidade do que modelos estáticos. Isso reforça a necessidade de projetar edificações que não apenas cumpram a norma, mas que também ofereçam flexibilidade e respondam dinamicamente ao clima.

Uma das estratégias mais eficazes para melhorar o desempenho térmico no sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico é o tratamento da envoltória por meio de isolamento adequado. A utilização de materiais isolantes, como lã de vidro, poliestireno expandido ou poliuretano, em paredes e, sobretudo, em coberturas, reduz significativamente as trocas de calor com o ambiente externo. Esta barreira térmica promove uma temperatura interna mais estável e confortável, minimizando a dependência de sistemas de climatização artificial (SILVA et al., 2018).

Aprofundando a discussão sobre as propriedades do sistema, a alta inércia térmica da alvenaria é uma característica intrínseca que deve ser utilizada estrategicamente. Essa propriedade, que se refere à capacidade do material de armazenar calor, resulta em um atraso térmico (defasagem) e um amortecimento da onda de calor externa. Em climas com grande variação de temperatura entre o dia e a noite, uma alta inércia pode manter os ambientes internos mais frescos durante o pico de calor e mais aquecidos durante a noite, contribuindo para a estabilização da temperatura e o conforto passivo (SILVA et al., 2017).

Contudo, a otimização do conforto térmico vai além da simples aplicação de isolantes, dependendo de uma abordagem integrada de projeto passivo. Estratégias como a orientação solar correta, o sombreamento de aberturas com beirais, brises ou vegetação, e o incentivo à ventilação cruzada para a remoção do calor interno são fundamentais para o desempenho da edificação. O aproveitamento inteligente da inércia térmica da alvenaria, por exemplo, pode ser otimizado com a ventilação noturna, que resfria a massa do edifício e ajuda a manter temperaturas mais amenas durante o dia seguinte (GURGEL, 2012).

A influência das aberturas e da cobertura no balanço energético é igualmente crítica. A escolha de vidros de controle solar, o dimensionamento correto das janelas

e o tratamento da cobertura com materiais de alta refletância (cores claras) ou a implementação de telhados verdes podem diminuir drasticamente a carga térmica incidente. O clima e as estações do ano exercem influência direta, mas a interação entre a edificação e o ambiente externo pode ser otimizada por meio dessas estratégias de projeto, que visam controlar os ganhos e perdas de calor de forma inteligente (BALTAR; KAEHLER; PEREIRA, 2006).

Além da refletância, a absorvância solar das superfícies externas é um fator de baixo custo e alto impacto. A escolha de cores claras para as fachadas e telhados reduz a quantidade de radiação solar absorvida, diminuindo o fluxo de calor para o interior da edificação. Em regiões de clima predominantemente quente, esta simples medida pode levar a uma redução significativa da temperatura superficial externa e, conseqüentemente, da necessidade de refrigeração, representando uma das estratégias passivas mais eficientes para o controle térmico em edificações convencionais (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O desempenho da edificação também é influenciado pelo seu entorno imediato. A presença de vegetação, por exemplo, contribui para o conforto através do sombreamento e do resfriamento evaporativo, criando um microclima mais ameno ao redor da construção. Em contraste, grandes áreas pavimentadas e impermeabilizadas absorvem e irradiam calor, contribuindo para o fenômeno das ilhas de calor urbanas e aumentando a carga térmica sobre o edifício. Portanto, um projeto paisagístico inteligente é uma ferramenta complementar essencial para a otimização do conforto térmico (BERALDO, 2006).

Do ponto de vista da sustentabilidade, a escolha dos materiais de construção desempenha um papel fundamental. O conceito de energia embutida, explorado por Oliveira (2016) na análise do ciclo de vida, evidencia que a produção de materiais convencionais, como o cimento e o aço, é altamente intensiva em energia. Portanto, a busca por um menor impacto ambiental no sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico pode se dar pela especificação de materiais de menor energia incorporada, pelo uso de agregados reciclados ou pela otimização do projeto estrutural para reduzir o consumo de cimento.

A relação entre conforto térmico e eficiência energética é direta. Uma edificação termicamente desconfortável inevitavelmente levará a um maior consumo de energia, pois seus ocupantes recorrem a sistemas de climatização para atingir

condições de conforto (MOLAR-OROZCO et al., 2020). Considerando que a geração de energia elétrica, seja por fontes hidrelétricas ou termelétricas, possui seus próprios custos e impactos ambientais, projetar edificações que demandem menos energia na fonte é um dos pilares da construção sustentável (CHAVES, 2018).

Além das estratégias passivas focadas na envoltória, a eficiência dos sistemas ativos da edificação é crucial. A especificação de equipamentos de climatização, iluminação e aquecimento de água com alta classificação de eficiência energética contribui diretamente para a redução do consumo total de energia do edifício. Estudos como o de Nogueira (2019) demonstram que a substituição de equipamentos obsoletos por modelos mais eficientes pode gerar economias energéticas substanciais, complementando os benefícios obtidos através do bom projeto da envoltória.

A durabilidade dos sistemas construtivos, um dos focos da NBR 15575, também possui uma interface com o desempenho térmico. Patologias como infiltrações e umidade ascendente não apenas comprometem a integridade dos materiais, mas também reduzem sua capacidade de isolamento térmico (a água é um bom condutor de calor). Garantir a estanqueidade à água e a proteção adequada da estrutura e da alvenaria é, portanto, essencial não apenas para a longevidade, mas também para a manutenção do desempenho energético projetado ao longo do tempo (SANTOS; RIBEIRO, 2021).

O clima e as estações do ano exercem influência na sensação de conforto térmico. No entanto, mesmo sendo possível o controle interno do clima na edificação, o ambiente externo não pode ser controlado, mas o mesmo pode ser minimizado por meio de ações que envolvam a edificação e a interação entre este e o meio ambiente (Beraldo, 2006).

De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2014) algumas das estratégias que podem ser adotadas em diferentes estações do ano e que podem promover ganhos ou perdas térmicas, e que estão diretamente relacionadas com os mecanismos básicos de trocas de calor (Figura 2).

FIGURA 2 – Estratégias de controle climático a serem adotadas no projeto arquitetônico

		CONDUÇÃO	CONVECÇÃO	RADIAÇÃO	EVAPORAÇÃO
INVERNO	Promover ganhos	Promover ganho de calor solar			
	Resistir às perdas	Minimizar fluxos de calor por condução	Minimizar fluxo de ar externo Minimizar infiltração de ar		
VERÃO	Resistir aos ganhos	Minimizar fluxos de calor por condução	Minimizar infiltração de ar	Minimizar ganho solar	Promover resfriamento evaporativo
	Promover Perdas	Promover resfriamento através do solo	Promover ventilação	Promover resfriamento radiativo	
	Fontes de calor	Atmosfera		Sol	
	Fontes de resfriamento	Solo	Atmosfera	Céu	Atmosfera

Fonte: LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014).

Por fim, é crucial reconhecer que o sucesso de todas essas estratégias depende intrinsecamente da qualidade da execução. Falhas construtivas, como pontes térmicas em pilares e vigas, vedações inadequadas em esquadrias ou falhas na aplicação do isolamento, podem comprometer severamente o desempenho projetado. A qualificação da mão de obra e um rigoroso controle de qualidade no canteiro são, portanto, pré-requisitos para que as estratégias de conforto e eficiência energética se materializem na prática (SOUZA et al., 2017).

Em síntese, a otimização do desempenho térmico em edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico é um processo multifacetado que vai além da simples conformidade com normas. Exige uma combinação sinérgica de estratégias, incluindo a qualificação da envoltória com isolamento adequado, a aplicação de princípios de design passivo, a seleção criteriosa de materiais de menor impacto ambiental e a busca contínua pela eficiência energética. Esta abordagem integrada é fundamental para que o sistema construtivo tradicional possa evoluir e atender às demandas contemporâneas por edificações mais confortáveis, econômicas e sustentáveis.

2.3.4 Estratégias bioclimáticas e desempenho térmico em edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico

A arquitetura bioclimática representa uma abordagem de projeto que busca a harmonia entre a edificação e o clima local, visando proporcionar conforto térmico aos ocupantes com o mínimo consumo de energia. Este princípio, longe de ser uma inovação recente, resgata saberes da arquitetura vernacular, mas os qualifica com o rigor da ciência da física das edificações. O objetivo central é o uso inteligente dos recursos naturais disponíveis — como a radiação solar, os ventos e a iluminação natural — para criar ambientes internos estáveis e agradáveis, reduzindo a dependência de sistemas mecânicos de climatização.

Para as edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, o ponto de partida de qualquer estratégia bioclimática é a compreensão e o manejo de sua característica térmica mais proeminente: a elevada inércia térmica. Derivada da alta massa dos materiais empregados, como o concreto, os tijolos cerâmicos e as argamassas, a inércia térmica confere à envoltória a capacidade de absorver e armazenar grandes quantidades de calor, liberando-o lentamente ao longo do tempo. Esta propriedade, quando bem gerenciada, pode ser uma poderosa aliada do conforto, mas, se ignorada, pode transformar o edifício em uma "estufa" desconfortável.

O funcionamento da inércia térmica se manifesta através de dois fenômenos principais: o amortecimento da onda de calor e o atraso térmico (defasagem). Conforme detalhado por Gurgel (2012), o amortecimento refere-se à capacidade da parede de reduzir a amplitude das variações de temperatura externas, tornando as condições internas mais estáveis. O atraso, por sua vez, é o tempo que o pico de calor leva para atravessar a parede. Em climas com grande amplitude térmica diária (dias quentes e noites frescas), uma parede com alto atraso térmico pode liberar durante a noite o calor absorvido durante o dia, um efeito desejável no inverno, mas problemático no verão.

A orientação solar correta é, portanto, a primeira e mais fundamental estratégia bioclimática. Em climas brasileiros, a orientação do maior eixo da edificação no sentido Leste-Oeste minimiza a exposição das fachadas de maior área (Norte e Sul) à intensa radiação solar da manhã e da tarde. A fachada Norte, que recebe sol de forma mais constante durante o inverno, pode ser projetada com aberturas para ganhos de calor passivos, enquanto a fachada Sul, menos insolada, é ideal para ambientes que requerem menos luz e calor.

Contudo, a orientação por si só é insuficiente sem um projeto de sombreamento eficaz. Elementos de proteção solar, como beirais, marquises, brises e vegetação, são absolutamente cruciais para edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, especialmente no verão. Sua função é impedir que a radiação solar direta atinja as superfícies opacas e transparentes da envoltória durante os horários mais quentes, evitando o acúmulo excessivo de calor na massa do edifício. Sem sombreamento, a alta inércia térmica se torna um passivo, armazenando um calor que será irradiado para o interior durante a noite, prolongando o desconforto.

A absorvância solar das superfícies externas, controlada pela cor e textura dos revestimentos, é outra estratégia de baixo custo e altíssimo impacto. Conforme demonstrado por Lamberts, Dutra e Pereira (2014), a utilização de cores claras em paredes e, sobretudo, em coberturas, aumenta a refletância da radiação solar, reduzindo drasticamente a quantidade de calor absorvida pela massa. Esta simples medida pode diminuir a temperatura superficial da cobertura em mais de 20°C, resultando em uma significativa redução da carga térmica nos ambientes internos.

A ventilação natural, especialmente a ventilação noturna, é a estratégia complementar essencial para o bom funcionamento da inércia térmica em climas quentes. Durante a noite, quando as temperaturas externas são mais amenas, a abertura de janelas permite que o ar mais frio "lave" as superfícies internas do edifício, removendo o calor acumulado na massa durante o dia. Este processo "descarrega" o sistema, preparando-o para absorver calor novamente no dia seguinte e mantendo as temperaturas internas mais baixas.

O entorno imediato da edificação também desempenha um papel bioclimático relevante. O planejamento paisagístico com a utilização de árvores de folha caduca pode prover sombreamento no verão e permitir a passagem do sol no inverno. A utilização de superfícies permeáveis e vegetadas no solo, em vez de áreas pavimentadas, ajuda a mitigar a formação de ilhas de calor locais, reduzindo a temperatura do ar que circunda o edifício e que adentra por meio da ventilação.

A aplicação da Norma de Desempenho (ABNT NBR 15.575) exige que essas estratégias sejam consideradas de forma integrada. A norma avalia o desempenho térmico da edificação como um sistema, onde o comportamento das paredes, coberturas e aberturas são interdependentes. Uma parede de alta inércia, por

exemplo, pode não atingir o desempenho mínimo se não for combinada com a cor de cobertura adequada e o percentual de abertura correto para a zona bioclimática em questão.

Em conclusão, o desempenho térmico de edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico não é uma propriedade intrínseca, mas sim o resultado de um projeto bioclimático consciente. A gestão inteligente da elevada inércia térmica, através da integração sinérgica de estratégias de orientação, sombreamento, cores de superfície e ventilação, é o que determina se a massa do edifício atuará como um elemento de conforto passivo ou como uma fonte de estresse térmico, sendo este o desafio central para projetistas que optam por este sistema construtivo.

2.3.5 Isolamento térmico e características dos materiais

O conceito de isolamento térmico refere-se à capacidade de um material ou sistema de resistir à passagem de calor, atuando como uma barreira ao fluxo térmico. No contexto das edificações, o principal mecanismo de transferência de calor combatido pelo isolamento é a condução, que ocorre através do contato direto entre as partículas de um material. A eficácia de um isolante é, portanto, inversamente proporcional à sua condutividade térmica (k), uma propriedade intrínseca que mede a facilidade com que o calor flui através dele.

Os materiais tradicionalmente empregados na alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, como o concreto e os blocos cerâmicos, apresentam um paradoxo de desempenho. Embora possuam alta capacidade térmica e massa específica — características que lhes conferem a desejável inércia térmica —, eles são, em sua essência, maus isolantes térmicos. A estrutura densa e sólida desses materiais resulta em uma condutividade térmica relativamente elevada (o concreto, por exemplo, pode ter um valor de k superior a $1,7 \text{ W/m.K}$), permitindo que o calor flua através deles com relativa facilidade quando comparado a materiais isolantes dedicados.

Para quantificar a performance de um sistema construtivo, utiliza-se a métrica da transmitância térmica (U -value), que representa a taxa de transferência de calor por unidade de área e por diferença de temperatura entre os dois lados do sistema

(medida em $\text{W/m}^2\cdot\text{K}$). O valor U é o inverso da resistência térmica total (R -value) do sistema. Para atingir os níveis de desempenho exigidos pela NBR 15.575, especialmente em zonas bioclimáticas mais rigorosas, uma parede de alvenaria simples frequentemente não possui resistência térmica suficiente, tornando necessária a incorporação de uma camada de isolamento dedicada.

Materiais isolantes como o poliestireno expandido (EPS), o poliestireno extrudado (XPS) e as lãs minerais (de vidro ou de rocha) são caracterizados por sua baixíssima condutividade térmica (geralmente abaixo de $0,04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Sua eficácia reside na estrutura celular que aprisiona o ar, um excelente isolante natural, impedindo seu movimento e, conseqüentemente, a transferência de calor por convecção. A adição de uma camada desses materiais a um sistema de alvenaria pode aumentar drasticamente sua resistência térmica total, reduzindo significativamente as perdas ou ganhos de calor.

A posição da camada de isolamento no sistema de parede é de importância crítica para seu desempenho. A solução tecnicamente mais eficaz é a aplicação do isolamento pelo lado externo, em um sistema conhecido como ETICS (External Thermal Insulation Composite System). Esta abordagem envolve toda a envoltória em uma camada contínua de isolamento, protegendo a estrutura principal das variações térmicas e, crucialmente, eliminando as pontes térmicas. No Brasil, contudo, essa solução ainda é pouco difundida devido aos custos e à falta de mão de obra especializada.

O fenômeno das pontes térmicas é o principal inimigo do desempenho térmico em edificações de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. Uma ponte térmica é uma área da envoltória com transmitância térmica significativamente maior que as áreas adjacentes, criando um "caminho fácil" para a passagem do calor. Nos sistemas convencionais brasileiros, os pilares e as vigas de concreto armado, que se estendem da estrutura interna para a face externa da parede, são as pontes térmicas mais comuns e problemáticas (Melo et al., 2018).

Esses elementos estruturais "furam" a continuidade da alvenaria, que já possui um isolamento modesto, e criam pontos de alta condutividade. Através dessas pontes, o calor flui muito mais rapidamente do que através do resto da parede, comprometendo severamente o desempenho global da envoltória. Além da perda de eficiência energética, as pontes térmicas podem causar problemas de

condensação superficial e o surgimento de mofo e bolor na face interna das paredes, pois a superfície fria nesses pontos pode atingir a temperatura de orvalho do ar interno.

Enquanto a condutividade térmica define a capacidade de isolamento, a difusividade térmica é a propriedade que governa a velocidade com que a temperatura se propaga através de um material, sendo a principal definidora da inércia térmica. A alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico possui alta capacidade térmica e condutividade moderada, resultando em uma difusividade que gera o já mencionado atraso térmico. A adição de uma camada de isolante (que possui baixa difusividade) altera drasticamente a resposta dinâmica do sistema, tornando a parede mais resistente às variações externas.

Os revestimentos e argamassas, como emboço e reboco, também contribuem para as características térmicas do sistema, embora seu impacto na resistência térmica total seja geralmente pequeno devido à sua espessura reduzida. Sua principal função térmica está no controle da absorção solar (através da pintura) e na proteção da parede contra a umidade. A presença de umidade nos poros dos materiais aumenta drasticamente sua condutividade térmica, pois a água é um condutor muito melhor que o ar, degradando significativamente o desempenho isolante da parede.

Em síntese, a análise das características dos materiais da alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico revela uma dualidade fundamental: a alta massa que proporciona inércia térmica e a alta condutividade que resulta em baixo isolamento. A otimização do desempenho térmico desse sistema não pode depender apenas de sua massa, mas exige uma abordagem integrada que incorpore camadas dedicadas de materiais isolantes e, fundamentalmente, um projeto cuidadoso para mitigar o efeito deletério das pontes térmicas, um desafio intrínseco e central à sua concepção estrutural.

2.3.6 A relação desafiadora entre a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e os créditos de Carbono

A relação entre o sistema construtivo de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o universo dos créditos de carbono é, em sua essência, uma

relação de débito e não de crédito. A metodologia e a filosofia por trás dos mercados de carbono, sejam eles regulados ou voluntários, baseiam-se na redução, remoção ou evitação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) em comparação a um cenário base (business-as-usual). Neste contexto, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, devido à sua altíssima pegada de carbono embutido, representa precisamente o cenário base que os projetos de descarbonização buscam superar. Seus principais componentes, o cimento e o aço, são produtos de indústrias extremamente intensivas em energia e emissões, o que torna a geração de créditos de carbono a partir de sua aplicação uma tarefa quase impossível.

O maior obstáculo é o carbono embutido na produção do cimento Portland, o aglomerante fundamental do concreto e das argamassas. Conforme a Agência Internacional de Energia (IEA), a indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de CO₂, sendo a segunda maior fonte emissora industrial. Essas emissões têm uma dupla origem: cerca de 40% provêm da queima de combustíveis fósseis para aquecer os fornos a mais de 1400°C, e os 60% restantes derivam da reação química da calcinação, na qual o carbonato de cálcio (CaCO₃) é decomposto em óxido de cálcio (CaO) e CO₂, liberando dióxido de carbono que estava geologicamente estocado. Este carbono de processo é uma emissão intrínseca e inevitável com a tecnologia atual, representando um passivo ambiental que não pode ser mitigado apenas com eficiência energética.

Adicionalmente, o aço utilizado para as armaduras do concreto estrutural também possui um elevado carbono embutido, oriundo principalmente do uso de coque metalúrgico nos altos-fornos para a redução do minério de ferro. Embora a reciclagem do aço possa reduzir significativamente essa pegada, a produção de aço primário ainda domina o mercado global. Diante desse cenário, a construção em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico não sequestra carbono; pelo contrário, ela é uma fonte líquida massiva de emissões de GEE liberadas na atmosfera antes mesmo de o edifício começar a ser utilizado, o que a posiciona no lado devedor da equação de carbono.

As oportunidades para a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico se aproximarem de uma neutralidade de carbono, e quiçá gerar créditos, são limitadas e dependem de inovações radicais que alteram a própria natureza do sistema. A utilização de cimentos de baixo carbono, como os cimentos de argila

calcinada (LC³), que substituem parte do clínquer (o principal componente emissor) por materiais suplementares, é uma das frentes de pesquisa mais promissoras (Scrivener et al., 2018). Outra possibilidade teórica seria a aplicação em larga escala de tecnologias de Captura, Utilização e Armazenamento de Carbono (CCUS) nas cimenteiras, embora esta ainda seja uma solução de altíssimo custo e complexidade técnica.

Em conclusão, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, em sua forma atual, não é um sistema que gera créditos de carbono; ela é o sistema cuja pegada de carbono serve de linha de base para a qualificação de outros sistemas mais sustentáveis, como o Wood Frame. A única via para que projetos envolvendo alvenaria possam pleitear algum tipo de benefício em mercados de carbono seria através de uma drástica redução do carbono operacional, projetando um edifício de altíssima eficiência energética (NZEB) que economizaria emissões ao longo de sua vida útil. No entanto, mesmo nesse caso, o projeto estaria apenas mitigando suas emissões futuras, sem conseguir compensar a imensa dívida de carbono embutido já contraída na fase de construção.

Embora a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresenta características consolidadas de robustez e alta inércia térmica, seus desafios relacionados à produtividade, sustentabilidade e, principalmente, à baixa capacidade de isolamento, motivam a busca por alternativas. Neste contexto, emerge o sistema Wood Frame, uma tecnologia construtiva que se baseia em princípios fundamentalmente distintos — leveza e alto isolamento térmico. O tópico a seguir se dedicará a explorar as características, benefícios e desafios deste sistema, estabelecendo o contraponto necessário para a análise comparativa que é o cerne desta tese.

2.4 EDIFICAÇÃO NO SISTEMA CONSTRUTIVO EM WOOD FRAME

A construção no sistema construtivo Wood Frame, também conhecido como estrutura em plataforma de madeira, tem se destacado como uma alternativa sustentável e eficiente para a edificação de residências e edifícios de pequeno e médio porte. Essa técnica construtiva utiliza uma estrutura de madeira leve,

composta por painéis de parede, lajes e telhados, que são montados no local da obra.

Ele é definido como um sistema de painéis estruturais compostos por uma estrutura de perfis de madeira de reflorestamento tratada (montantes, travessas, vigas), contraventados por placas (geralmente OSB - Oriented Strand Board), com o interior das cavidades preenchido por material isolante. Neste sistema, as paredes são, ao mesmo tempo, estrutura e vedação, formando um sistema integrado e de alto desempenho (Molina; Junior, 2010).

A origem do Wood Frame remonta à América do Norte do século XIX, onde a necessidade de construção rápida e a abundância de madeira levaram ao desenvolvimento desta técnica leve e eficiente. Ao longo do século XX, o sistema foi aprimorado e industrializado, tornando-se o método construtivo dominante para residências nos Estados Unidos, Canadá e em diversos países da Europa e Oceania. Sua popularidade global se deve à combinação de rapidez construtiva, eficiência térmica e sustentabilidade (THALLON, 2008).

O funcionamento do sistema baseia-se na pré-fabricação e na montagem a seco. Os painéis de paredes, pisos e tesouras de telhado são fabricados em um ambiente industrial controlado, com alta precisão dimensional, e transportados para o canteiro de obras para montagem. No local, os painéis são rapidamente içados e conectados sobre uma fundação (geralmente do tipo radier). Após a montagem da estrutura, são instaladas as camadas complementares: membranas de proteção, instalações, revestimentos internos (gesso acartonado) e externos. Todo o processo é notavelmente mais rápido, limpo e com menor geração de resíduos do que o método convencional (Brüggemann, 2017).

No Brasil, a introdução do sistema Wood Frame é relativamente recente, ganhando impulso a partir dos anos 2000. Sua difusão tem sido gradual, impulsionada pela busca por maior produtividade e sustentabilidade na construção civil. A publicação de diretrizes técnicas, como a Diretriz SINAT nº 005, e a crescente familiaridade de projetistas e construtores com a tecnologia têm contribuído para sua expansão. No entanto, o sistema ainda representa uma pequena fração do mercado nacional quando comparado à hegemonia da alvenaria (SHIGUE, 2018).

O principal problema para a consolidação do Wood Frame no Brasil é a natureza cultural e mercadológica. Existe uma barreira de aceitação por parte de um

mercado consumidor que historicamente associa a solidez e a durabilidade a construções pesadas de alvenaria e concreto. A percepção de que uma construção leve de madeira seria frágil ou pouco durável ainda é um preconceito a ser superado. Além disso, a necessidade de mão de obra especializada, tanto para o projeto quanto para a montagem, e uma cadeia de suprimentos ainda em desenvolvimento, são desafios logísticos e econômicos significativos (VASQUES, 2014). A falta de conhecimento técnico aprofundado por parte de muitos profissionais e a adaptação dos projetos às especificidades do sistema também são obstáculos que demandam investimento contínuo em capacitação e disseminação de informação (ALVES; PONCIANO, 2018).

Ao longo dos anos, diversos estudos têm sido realizados para analisar as características e vantagens desse sistema construtivo. A revisão da literatura sobre edificação no sistema construtivo Wood Frame abrange uma variedade de aspectos, desde a sustentabilidade e eficiência energética até a resistência estrutural e o conforto térmico.

De acordo com Molina; Junior (2010), a madeira de reflorestamento tratada é o insumo principal do método construtivo a seco, desta maneira, é realizada a estruturação em perfil destas madeiras, de forma a formar painéis de piso, de paredes e telhados, e estes podem ser revestidos com outros insumos, com o objetivo de melhorar o conforto térmico e acústico e consequentemente promover a proteção da construção contra o fogo e as intempéries climáticas.

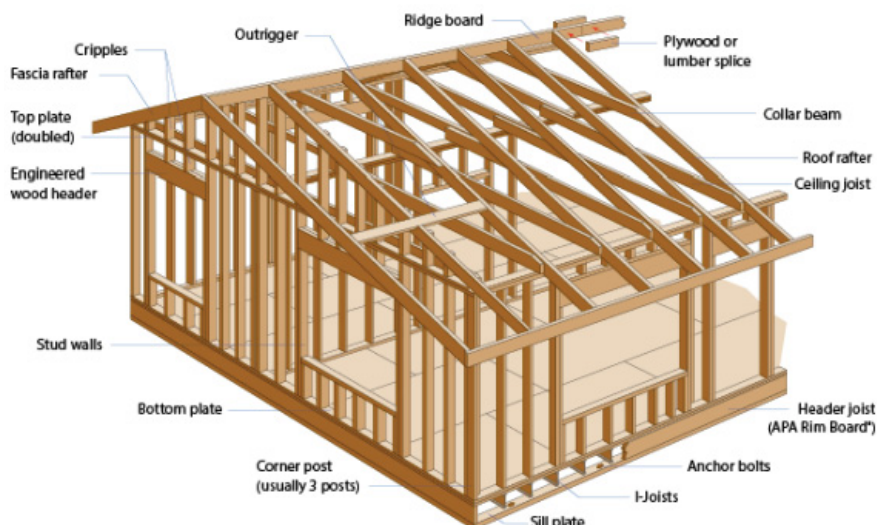
O sistema construtivo em Wood Frame tem se mostrado uma alternativa sustentável e promissora para a construção de edificações. Ao utilizar a madeira como principal material estrutural, esse sistema oferece benefícios ambientais significativos. A madeira é um recurso renovável, amplamente disponível e com menor impacto ambiental em comparação a outros materiais de construção. Além disso, o processo de fabricação e montagem das estruturas em Wood Frame consome menos energia e produz menos resíduos em comparação aos sistemas construtivos convencionais. Essa abordagem sustentável também se estende ao longo da vida útil da edificação, já que a madeira tem capacidade de armazenar carbono e reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, o sistema construtivo em Wood Frame destaca-se como uma alternativa viável para promover a sustentabilidade na construção civil (Friedmann, 2019).

A madeira utilizada no sistema construtivo em Wood Frame possui características de resistência que a tornam uma excelente opção para a construção de edificações. A madeira devidamente tratada e processada apresenta alta resistência mecânica, capaz de suportar as cargas estruturais exigidas pelas normas e regulamentações. Além disso, a sua relação resistência-peso é bastante favorável, o que contribui para a leveza da estrutura e facilita o transporte e a montagem das peças no canteiro de obras. A durabilidade da madeira também pode ser aprimorada por meio de tratamentos preservativos, protegendo-a contra ação de insetos, fungos e umidade. Dessa forma, a madeira no sistema construtivo em Wood Frame oferece um equilíbrio entre resistência, durabilidade e praticidade, tornando-se uma escolha confiável e eficiente para a construção de edificações sustentáveis e de qualidade, aliadas a propriedades térmicas e acústicas que contribuem para o conforto ambiental das edificações (Salenikovich et al., 2019).

A utilização do sistema construtivo em Wood Frame proporciona uma maior eficiência energética nas edificações, representando uma solução sustentável e econômica. A madeira é um excelente isolante térmico, o que contribui para reduzir a transferência de calor entre o interior e o exterior da edificação. Isso significa que, durante os períodos de alta temperatura, a estrutura em Wood Frame oferece uma maior resistência ao calor externo, mantendo o ambiente interno mais fresco e confortável.

Sendo assim, o uso da madeira como material definitivo na construção com o sistema Wood Frame, é fundamental uma padronização da estrutura, para que se otimizem os recursos utilizados. A Figura 3 apresenta um modelo de estrutura em wood frame, o que demonstra quase todos os elementos estruturais que devem estar presentes em uma construção neste modelo (BERRIEL, 2011).

FIGURA 3 – Exemplo de estrutura em Wood Frame

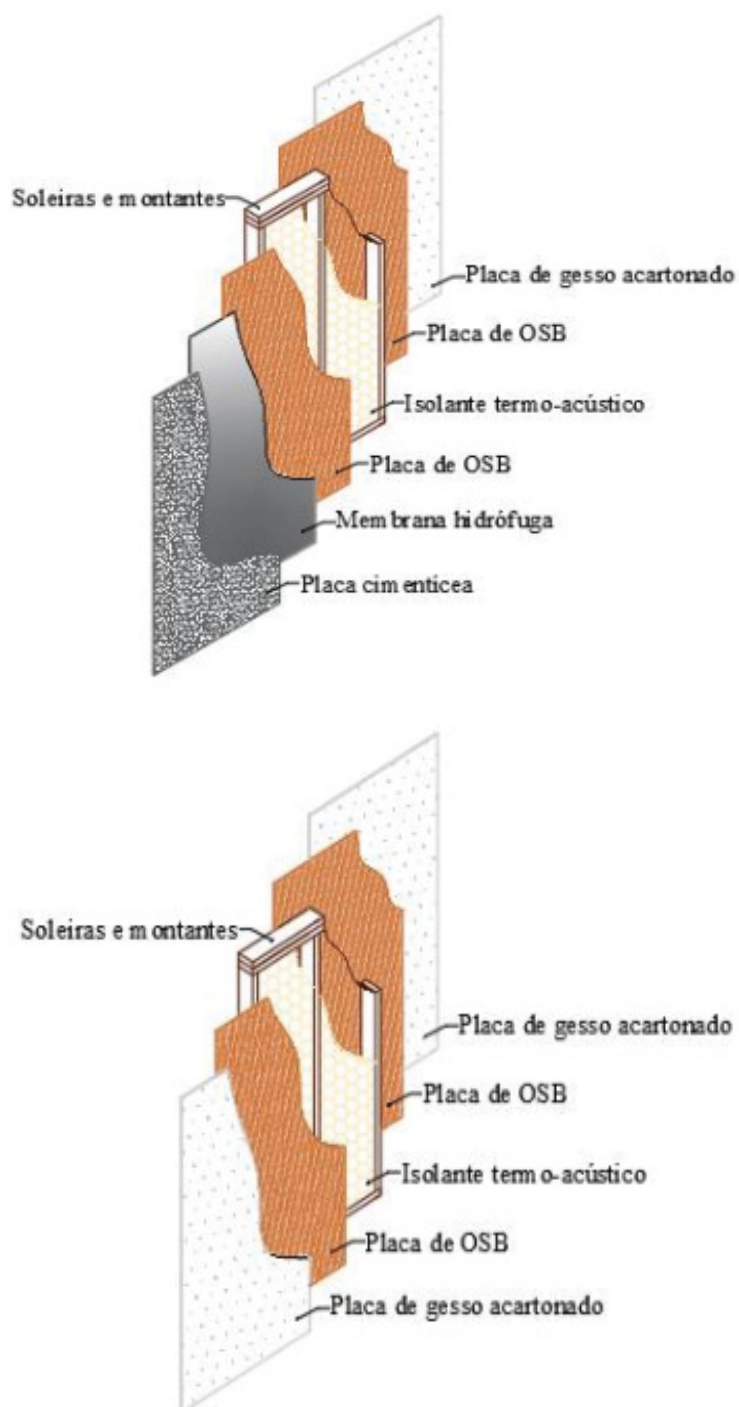


Autor: Construindo Decor (2023).

Da mesma forma, durante os períodos de baixas temperaturas, o sistema construtivo em Wood Frame minimiza a perda de calor, mantendo o ambiente interno aquecido. Além disso, a leveza da estrutura em madeira possibilita um melhor aproveitamento de técnicas de isolamento térmico, como o uso de materiais isolantes nas paredes, pisos e coberturas. Isso contribui para a redução do consumo de energia, tanto para o aquecimento quanto para o resfriamento da edificação. Portanto, a utilização do sistema construtivo em Wood Frame apresenta-se como uma opção eficiente para promover a eficiência energética nas edificações, resultando em benefícios tanto para o conforto dos usuários quanto para a redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa (Straube & Burnett, 2018).

Brüggemann (2017) elaborou modelo do Sistema Wood frame em que as camadas que das paredes internas e externas são compostas por materiais que variam de acordo com a aplicação, e que as estruturas indicadas são exemplificadas na Figura 4.

FIGURA 4 – Composição das camadas que constituem a parede externa e interna do sistema Wood Frame respectivamente



FONTE: Brüggemann (2017).

A resistência sísmica das construções em Wood Frame tem sido amplamente estudada com o objetivo de garantir a segurança estrutural dessas edificações em regiões sísmicas. Diversos estudos e pesquisas têm sido conduzidos para

compreender o comportamento dinâmico e a capacidade de dissipação de energia das estruturas em Wood Frame durante eventos sísmicos.

Os resultados desses estudos têm mostrado que, quando projetadas e construídas adequadamente, as estruturas em Wood Frame possuem uma boa resistência aos esforços provocados pelos tremores, sendo capazes de dissipar a energia sísmica e garantir a segurança dos ocupantes. Essa resistência é alcançada por meio do uso de conexões adequadas entre os elementos estruturais, como placas de compensado e tirantes metálicos, além da adoção de técnicas de reforço sísmico, como a utilização de contraventamentos e chumbadores. Assim, os estudos sobre a resistência sísmica das construções em Wood Frame contribuem para o aprimoramento contínuo desse sistema construtivo, garantindo sua aplicabilidade segura em áreas sujeitas a atividades sísmicas (Ellingwood & Ritter, 2017).

A facilidade de customização e adaptação do sistema construtivo em Wood Frame permite uma maior flexibilidade arquitetônica, atendendo às demandas específicas de cada projeto. Diferente dos sistemas construtivos convencionais, onde as estruturas são mais rígidas e limitam as possibilidades de design, o sistema em Wood Frame oferece maior liberdade para criar espaços personalizados e soluções arquitetônicas diferenciadas. As peças de madeira podem ser facilmente cortadas e moldadas de acordo com as necessidades do projeto, permitindo a criação de formas e volumes variados. Além disso, a leveza do material facilita o transporte e a montagem das estruturas, tornando possível a construção de edificações em locais de difícil acesso ou terrenos com restrições topográficas.

Essa flexibilidade arquitetônica oferecida pelo sistema construtivo em Wood Frame permite a realização de projetos mais criativos e personalizados, atendendo às expectativas dos clientes e proporcionando espaços funcionais e esteticamente agradáveis (Grattan & Thomas, 2016).

Alves e Ponciano (2018), destacam que o Sistema Wood Frame é vantajoso para o consumidor final, pois permite uma maior rapidez na entrega da obra, com execução modular o que possibilita a ampliação de acordo com a necessidade do cliente, assim como tem-se também a facilidade na instalação da parte elétrica e hidráulica, há uma garantia de durabilidade da obra, alta resistência a impactos, sendo um sistema de fácil manutenção e de baixo custo, com o uso de isolamento térmico acústico excelente.

2.4.1 Características e benefícios do sistema construtivo em Wood Frame

O sistema construtivo em Wood Frame tem ganhado destaque como uma alternativa sustentável e eficiente para a construção de edificações. A utilização da madeira como material estrutural apresenta diversas características e benefícios que têm despertado interesse tanto na indústria da construção civil quanto na academia. Esta revisão tem como objetivo explorar as principais características e benefícios do sistema construtivo em Wood Frame, destacando suas vantagens em termos de sustentabilidade.

Por décadas o sistema construtivo wood frame tem sido uma relevante e muito popular forma de construção principalmente em países desenvolvidos da América do Norte, Oceania e Europa (THALLON, 2008).

A utilização da madeira como material estrutural no sistema construtivo em Wood Frame contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade ambiental, uma vez que a madeira é um recurso renovável e possui capacidade de armazenar carbono (Marques et al., 2018). Além do sistema construtivo em Wood Frame apresentar menor consumo de energia durante a produção e menor impacto ambiental em comparação a outros materiais de construção, como o concreto e o aço (Taguchi et al., 2019).

Em estudo realizado por Lopes (2013), o autor realizou um comparativo de custos, apresentando também as vantagens e desvantagens do sistema para obras de pequeno e médio porte comparados ao sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o sistema em Wood Frame. Desta forma, o autor observou que para o sistema Wood Frame houve uma economia de 8% no custo final por metro quadrado quando comparado ao sistema convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, bem como uma redução de 9% nos custos dos materiais utilizados e 60% de redução no custo de mão de obra. O autor ressaltou em seu estudo que o sistema Wood Frame teve também desempenho termo acústico, o que resultou consequentemente na praticidade das instalações e manutenção dos sistemas elétrico e hidráulico, com considerável redução no uso de aço e concreto, elementos estes que são de elevado consumo de recursos naturais e que são causadores de emissão durante sua fabricação de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Os resultados em isolamento térmico foram observados por Simões et al (2020), que salientaram que em relação ao desempenho as estruturas em Wood Frame apresentam excelente desempenho em termos de isolamento térmico, resultando em menor consumo de energia para aquecimento e resfriamento das edificações. Estudos têm demonstrado que as construções em Wood Frame possuem boa resistência sísmica quando projetadas e construídas de acordo com as normas e regulamentos específicos para áreas de atividade sísmica" (Feng et al., 2017). O sistema construtivo em Wood Frame contribui para o conforto acústico das edificações, reduzindo a transmissão de ruídos indesejáveis e proporcionando um ambiente mais silencioso aos ocupantes (Blomquist et al., 2016).

QUADRO 2 – Principais características do sistema construtivo Wood Frame

Sustentabilidade	A madeira utilizada no sistema construtivo em Wood Frame é um recurso renovável, contribuindo para a redução da demanda por materiais não renováveis e promovendo a sustentabilidade ambiental.	A utilização da madeira como material de construção apresenta um menor impacto ambiental em comparação a outros materiais, como o concreto e o aço, devido ao menor consumo de energia durante a produção e menor emissão de gases de efeito estufa.	A madeira tem a capacidade de armazenar carbono, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a mitigação das mudanças climáticas.
Desempenho	O sistema construtivo em Wood Frame apresenta excelente desempenho em termos de isolamento térmico, resultando em menor consumo de energia para aquecimento e resfriamento das edificações.	Estudos têm demonstrado que as estruturas em Wood Frame possuem boa resistência sísmica, desde que projetadas e construídas de acordo com as normas e regulamentos específicos para áreas de atividade sísmica	A madeira utilizada no sistema em Wood Frame contribui para o isolamento acústico das edificações, reduzindo a transmissão de ruídos indesejáveis e proporcionando maior conforto aos ocupantes.

Flexibilidade Arquitetônica	O sistema construtivo em Wood Frame permite maior flexibilidade arquitetônica, possibilitando a customização e adaptação das edificações de acordo com as necessidades e preferências dos clientes.	A flexibilidade arquitetônica refere-se à capacidade de um espaço ou edifício se adaptar e responder a diferentes usos e necessidades ao longo do tempo. Isso significa que o projeto arquitetônico é concebido de forma a permitir modificações e reconfigurações sem comprometer a integridade estrutural ou funcional do espaço.	A flexibilidade arquitetônica implica em um design que pode ser facilmente modificado ou adaptado para acomodar diferentes funções, layouts ou atividades. Isso pode envolver o uso de elementos móveis, divisórias flexíveis, sistemas modulares ou outras soluções arquitetônicas que permitam ajustes conforme as necessidades dos usuários ou as demandas do ambiente.
-----------------------------	---	---	--

Fonte: Organizado pelo autor (2023).

2.4.2 Conforto térmico e sustentabilidade no sistema construtivo Wood Frame

A busca por melhores condições de conforto nas habitações tem sido uma constante na arquitetura, impulsionando um crescente interesse em formas e estratégias bioclimáticas que possam ser aplicadas para otimizar o desempenho térmico dos edifícios. A satisfação do ser humano com o ambiente térmico, um conceito central para o conforto, está diretamente ligada ao delicado equilíbrio entre o calor produzido pelo corpo e as trocas de calor com o meio circundante, um processo que envolve radiação, convecção, condução e evaporação (DUARTE, 2016).

Uma das abordagens mais eficazes para alcançar o conforto térmico em habitações é a aplicação de princípios de design passivo, que visam reduzir a demanda energética da edificação. Isso envolve uma adaptação criteriosa ao clima local, considerando a orientação solar, o dimensionamento e a proteção das

aberturas, o estímulo à ventilação cruzada e o aproveitamento inteligente da massa térmica dos materiais, estratégias que, em conjunto, minimizam a necessidade de climatização artificial (GURGEL, 2012).

Dentro das estratégias passivas, a correta orientação da edificação e o tratamento das aberturas são fundamentais. A orientação do eixo longitudinal no sentido Leste-Oeste, por exemplo, minimiza a exposição das fachadas de maior área à insolação direta nos horários mais críticos. Adicionalmente, o uso de elementos de sombreamento, como beirais e brises, e a especificação de vidros com controle solar são cruciais para controlar os ganhos de calor indesejados, especialmente no verão (BALTAR; KAEHLER; PEREIRA, 2006).

O uso da vegetação e de coberturas verdes também se apresenta como uma estratégia bioclimática de alto impacto. A vegetação no entorno da edificação contribui para o sombreamento e o resfriamento evaporativo, criando um microclima mais ameno. Telhados verdes, por sua vez, além de promoverem isolamento térmico, retardam o aquecimento da cobertura e auxiliam no seu resfriamento, melhorando significativamente o conforto interno e mitigando o efeito de ilha de calor urbana (BERALDO, 2006).

No Brasil, a ABNT NBR 15575 estabelece os critérios mínimos de desempenho térmico que todas as habitações devem atender. A norma considera a edificação como um sistema integrado, avaliando o desempenho conjunto de paredes, portas, janelas e telhados. Os requisitos para ambientes de permanência prolongada (APP), como dormitórios e salas, visam garantir que, no verão, a temperatura interna não exceda a externa e, no inverno, se mantenha acima de um patamar mínimo, promovendo condições básicas de habitabilidade (ABNT, 2021).

O isolamento térmico é um componente chave para o desempenho da envoltória, atuando como uma barreira que dificulta a transferência de calor entre o ambiente interno e o externo. Em sistemas construtivos como o Wood Frame, a camada de isolamento térmico inserida na cavidade das paredes e sobre o forro é o principal responsável pela resistência térmica do conjunto. Essa barreira tem o objetivo de retardar a passagem de calor, mantendo os ambientes mais frescos no verão e mais aquecidos no inverno, o que resulta em menor consumo de energia para climatização (ALLEN; THALLON, 2011).

A eficiência do isolamento não depende apenas do material utilizado, mas também de sua correta instalação e da eliminação de pontes térmicas. Pontes térmicas são áreas de alta condutividade (como pilares e vigas de concreto em contato direto com o exterior) que "furam" a camada isolante, comprometendo o desempenho global da envoltória. Um projeto cuidadoso deve identificar e tratar essas áreas para garantir a continuidade da barreira térmica, um desafio particularmente relevante em sistemas de alvenaria convencional (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O desempenho de um material isolante é medido por sua resistência térmica (valor R). Quanto maior o valor R, maior a sua capacidade de resistir ao fluxo de calor. A escolha do material e da espessura do isolamento deve ser feita com base nas exigências climáticas da região e nos requisitos da NBR 15575, buscando um equilíbrio entre o desempenho desejado e os custos de implementação (KIBERT et al., 2016).

A madeira se destaca no contexto da construção sustentável por ser um recurso natural, renovável e biodegradável. Diferentemente de materiais de origem mineral, a madeira utilizada na construção civil, quando proveniente de florestas manejadas de forma responsável, faz parte de um ciclo que permite a regeneração da matéria-prima, tornando-a uma opção de menor impacto ambiental (SHIGUE, 2018).

Historicamente, a madeira é um dos materiais de construção mais antigos, valorizada por sua disponibilidade, facilidade de manuseio e excelente relação resistência/peso. Suas propriedades isolantes naturais também são uma vantagem intrínseca. No entanto, sua vulnerabilidade a agentes biológicos e ao fogo exige tratamentos e detalhes construtivos específicos para garantir sua durabilidade e segurança ao longo do tempo (PFEIL, 2003).

Em sistemas como o Wood Frame, a madeira não atua sozinha. A sua combinação com isolantes térmicos eficazes, como lãs minerais (de vidro ou rocha) e poliestireno expandido (EPS), potencializa o desempenho da envoltória. Esses materiais, com baixíssima condutividade térmica, preenchem as cavidades da estrutura, criando um sistema de alto desempenho que contribui para a eficiência energética e para a redução dos custos operacionais da edificação (PRAZERES, ALBERTI e ARAKAWA, 2022).

O desempenho do Wood Frame também é favorecido por sua baixa inércia térmica, que permite uma resposta rápida aos sistemas de climatização. Enquanto sistemas de alta massa demoram mais para aquecer e resfriar, o Wood Frame alcança a temperatura de conforto desejada mais rapidamente, o que pode ser vantajoso em climas que exigem climatização intermitente ou em edificações de uso não contínuo (CUCE et al., 2020).

A flexibilidade de projeto do sistema Wood Frame permite uma fácil integração de soluções de alto desempenho. A espessura das paredes pode ser ajustada para acomodar maiores quantidades de isolamento térmico, e a precisão do sistema facilita a instalação de esquadrias de alta performance e a correta vedação de juntas, garantindo a estanqueidade ao ar, um fator crucial para a eficiência energética (FRIEDMANN, 2019).

A busca por eficiência energética em edificações vai além do conforto, estando ligada à redução do consumo de recursos durante a fase de uso. Ambientes termicamente desconfortáveis geram uma maior demanda por climatização artificial, impactando diretamente o consumo de energia elétrica da residência e, conseqüentemente, a demanda sobre a infraestrutura energética do país (MOLAR-OROZCO et al., 2020).

A energia consumida por uma edificação não se limita à sua fase de operação. A análise do ciclo de vida (ACV) considera também a "energia embutida" nos materiais, ou seja, a energia gasta em sua extração, processamento, transporte e construção. Materiais como a madeira geralmente apresentam menor energia embutida em comparação ao aço e ao cimento, o que confere ao sistema Wood Frame uma vantagem sob a ótica da sustentabilidade global (OLIVEIRA, 2016).

A eficiência dos sistemas e equipamentos instalados na edificação também é um fator crucial. A especificação de lâmpadas LED, chuveiros de baixo consumo e eletrodomésticos com selo de eficiência contribui para a redução do consumo de energia. A combinação de um bom projeto passivo da envoltória com sistemas ativos eficientes é a chave para alcançar edificações de altíssimo desempenho energético e baixo custo operacional (NOGUEIRA, 2019).

A relação entre geração de energia e construção civil é bidirecional. O alto consumo energético das edificações pressiona a matriz energética, que no Brasil, apesar de predominantemente hídrica, recorre a termelétricas, que são mais

poluentes e caras, em períodos de baixa nos reservatórios. Portanto, a eficiência energética nas edificações é uma estratégia fundamental para a segurança energética e para a modicidade tarifária (CHAVES, 2018).

A durabilidade dos sistemas construtivos, um dos focos da NBR 15575, também possui uma interface com o desempenho térmico. Patologias como infiltrações e umidade ascendente não apenas comprometem a integridade dos materiais, mas também reduzem sua capacidade de isolamento térmico (a água é um bom condutor de calor). Garantir a estanqueidade à água e a proteção adequada da estrutura e da alvenaria é, portanto, essencial não apenas para a longevidade, mas também para a manutenção do desempenho energético projetado ao longo do tempo (SANTOS; RIBEIRO, 2021).

Finalmente, é crucial reconhecer que o sucesso de todas essas estratégias depende intrinsecamente da qualidade da execução. Falhas construtivas, como pontes térmicas em pilares e vigas, vedações inadequadas em esquadrias ou falhas na aplicação do isolamento, podem comprometer severamente o desempenho projetado. A qualificação da mão de obra e um rigoroso controle de qualidade no canteiro são, portanto, pré-requisitos para que as estratégias de conforto e eficiência energética se materializem na prática (SOUZA et al., 2017).

Em conclusão, a otimização do conforto térmico e da eficiência energética nas habitações modernas exige uma abordagem holística e integrada. A aplicação de estratégias bioclimáticas, a seleção de sistemas construtivos de alto desempenho, como o Wood Frame, o uso criterioso de materiais de baixo impacto ambiental e a especificação de equipamentos eficientes são elementos que, combinados, permitem criar edificações que sejam não apenas confortáveis e econômicas, mas também mais responsáveis e alinhadas aos princípios da sustentabilidade.

A análise do sistema Wood Frame revela que seu desempenho superior não reside apenas no material, mas na inteligência de um sistema multicamadas projetado para o isolamento. Isso demonstra que a performance de uma edificação é, em grande medida, uma consequência direta das decisões de projeto. Sendo assim, a discussão avança para as Estratégias Bioclimáticas e de Desempenho Térmico, uma vez que, independentemente do sistema construtivo escolhido, a aplicação de princípios de design passivo é a ferramenta mais poderosa para

otimizar o conforto e a eficiência energética, servindo como a base sobre a qual o desempenho de qualquer sistema é construído ou potencializado.

2.4.3 Estratégias Bioclimáticas e desempenho térmico em edificações

A busca por melhores condições de habitabilidade tem impulsionado o estudo de formas e estratégias bioclimáticas que possam ser aplicadas em projetos arquitetônicos para melhorar o conforto térmico. A arquitetura bioclimática visa criar um diálogo harmonioso entre a edificação e o clima local, utilizando recursos naturais como o sol e o vento para garantir o bem-estar dos ocupantes e minimizar a dependência de sistemas mecânicos de climatização.

O conceito de conforto térmico, fundamental para essa abordagem, é definido como um estado mental de satisfação com o ambiente térmico. A ausência de conforto está diretamente relacionada às trocas de calor entre o corpo e o meio, e a busca por esse equilíbrio é um impulso fisiológico constante. Portanto, projetar para o conforto é projetar para a saúde e o bem-estar do ser humano em seu habitat (DUARTE, 2016).

Uma das principais diretrizes para alcançar o conforto de forma eficiente é a aplicação dos princípios do design passivo. Conforme sugere Gurgel (2012), isso envolve uma série de estratégias interligadas, como a adaptação da edificação ao clima local, a correta orientação solar, o sombreamento adequado das aberturas, o estímulo à ventilação cruzada e o uso inteligente da massa térmica dos materiais. Essas estratégias, quando bem integradas, reduzem drasticamente a demanda energética da edificação.

No Brasil, a ABNT NBR 15575 serve como o principal instrumento regulatório para o desempenho térmico das habitações. A norma estabelece critérios mínimos para os componentes da envoltória (paredes, coberturas, esquadrias), considerando a edificação como um sistema integrado. A avaliação do desempenho é focada nos ambientes de permanência prolongada (APP), como dormitórios e salas, visando garantir condições básicas de conforto ao longo do ano (ABNT, 2021).

Ao detalhar os requisitos, a norma exige que, no verão, a temperatura interna dos APPs não supere a temperatura máxima externa, enquanto no inverno, deve se manter igual ou superior à temperatura mínima externa acrescida de 3°C. Esses

critérios, embora básicos, forçam os projetistas a considerar o comportamento térmico da envoltória desde as fases iniciais do projeto, incentivando a adoção de soluções mais eficientes do que as práticas construtivas mínimas anteriormente adotadas (ABNT, 2021).

2.4.4 Isolamento Térmico e Características dos Materiais

O isolamento térmico é um componente chave para o desempenho da envoltória, atuando como uma barreira que dificulta a transferência de calor entre o ambiente interno e o externo. Em sistemas construtivos como o Wood Frame, a camada de isolamento térmico inserida na cavidade das paredes e sobre o forro é o principal responsável pela resistência térmica do conjunto. Essa barreira tem o objetivo de retardar a passagem de calor, mantendo os ambientes mais frescos no verão e mais aquecidos no inverno, o que resulta em menor consumo de energia para climatização (ALLEN; THALLON, 2011).

A eficiência do isolamento não depende apenas do material utilizado, mas também de sua correta instalação e da eliminação de pontes térmicas. Pontes térmicas são áreas de alta condutividade (como pilares e vigas de concreto em contato direto com o exterior) que "furam" a camada isolante, comprometendo o desempenho global da envoltória. Um projeto cuidadoso deve identificar e tratar essas áreas para garantir a continuidade da barreira térmica, um desafio particularmente relevante em sistemas de alvenaria convencional (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

O desempenho de um material isolante é medido por sua resistência térmica (valor R). Quanto maior o valor R, maior a sua capacidade de resistir ao fluxo de calor. A escolha do material e da espessura do isolamento deve ser feita com base nas exigências climáticas da região e nos requisitos da NBR 15575, buscando um equilíbrio entre o desempenho desejado e os custos de implementação (KIBERT et al., 2016).

Historicamente, a madeira é um dos materiais de construção mais antigos, valorizada por sua disponibilidade, facilidade de manuseio e excelente relação resistência-peso. Sua baixa condutividade térmica a torna um isolante natural. Contudo, para garantir sua durabilidade, é essencial que a madeira seja

devidamente tratada contra umidade e agentes xilófagos e que o projeto inclua detalhes construtivos que a protejam, como beirais e afastamento do solo (PFEIL, 2003).

A madeira se destaca no contexto da construção sustentável por ser um recurso natural, renovável e biodegradável. Diferentemente de materiais de origem mineral, a madeira utilizada na construção civil, quando proveniente de florestas manejadas de forma responsável, faz parte de um ciclo que permite a regeneração da matéria-prima, tornando-a uma opção de menor impacto ambiental em termos de uso de recursos (SHIGUE, 2018).

A transferência de calor ocorre por três mecanismos: condução, convecção e radiação. O isolamento térmico atua primariamente contra a condução (transferência por contato direto) e a convecção (transferência pelo movimento de fluidos, como o ar). Materiais como lã de vidro e EPS funcionam aprisionando o ar em pequenas células, impedindo sua movimentação e, assim, a transferência de calor por convecção (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A radiação térmica, por sua vez, é a transferência de calor por ondas eletromagnéticas. Para combatê-la, são utilizadas barreiras radiantes, geralmente folhas de material de baixa emissividade (como alumínio). Essas barreiras, quando instaladas com um espaço de ar adjacente, são altamente eficazes em refletir o calor radiante, sendo particularmente úteis em coberturas para bloquear o calor do sol (GURGEL, 2012).

É fundamental distinguir entre isolamento térmico e inércia térmica. Enquanto o isolamento resiste à passagem do calor, a inércia (ou capacidade térmica) se refere à capacidade de um material de armazenar calor. Sistemas leves e bem isolados (como o Wood Frame) têm baixa inércia, enquanto sistemas pesados (como a alvenaria) têm alta inércia. A escolha da estratégia ideal depende do clima e do padrão de uso da edificação (SILVA et al., 2017).

A cobertura é frequentemente o elemento da edificação que mais recebe radiação solar e, portanto, a principal fonte de ganho de calor. Um isolamento térmico robusto no forro ou diretamente sob o telhado é uma das intervenções mais custo-efetivas para melhorar o conforto térmico de uma residência, reduzindo drasticamente a carga térmica sobre os ambientes inferiores (BALTAR; KAEHLER; PEREIRA, 2006).

A presença de umidade compromete severamente a capacidade de isolamento de muitos materiais. A água, sendo um bom condutor térmico, preenche os espaços de ar que deveriam estar secos, reduzindo a resistência térmica do material. Por isso, garantir a estanqueidade da envoltória e o controle de vapor são essenciais para a manutenção do desempenho do isolamento a longo prazo (PFEIL, 2003).

2.4.5 Ventilação e Iluminação Natural

A ventilação natural é uma ferramenta poderosa do projeto bioclimático. O correto posicionamento de aberturas em fachadas opostas ou adjacentes pode promover a ventilação cruzada, que é eficaz na remoção do calor interno e na melhoria da sensação de conforto em climas quentes e úmidos. Aberturas zenitais, como clarabóias operáveis, também podem ser utilizadas para induzir a ventilação por efeito chaminé, onde o ar quente sobe e escapa pela parte mais alta da edificação (BALTAR; KAEHLER; PEREIRA, 2006).

A iluminação natural, por sua vez, não só reduz a necessidade de iluminação artificial durante o dia, economizando energia, mas também contribui para o bem-estar e a saúde dos ocupantes. A NBR 15575 estabelece níveis mínimos de iluminação natural para os ambientes, medidos através do Fator de Luz Diurna (FDL), que representa a razão entre a iluminância interna e a externa. Um bom projeto deve equilibrar a entrada de luz para atender a esses níveis sem, no entanto, causar ofuscamento ou ganho de calor excessivo (ABNT, 2013).

Para tanto, estratégias como o uso de prateleiras de luz, que refletem a luz natural para o fundo do ambiente, e a especificação de vidros com diferentes níveis de transmissão luminosa podem ser empregadas. A integração entre o projeto de iluminação natural e o de proteção solar é crucial para maximizar os benefícios de ambos sem que um comprometa o outro (GURGEL, 2012).

O entorno da edificação também desempenha um papel crucial. A utilização de vegetação para sombreamento e o uso de superfícies permeáveis no solo ajudam a criar um microclima mais ameno. Telhados verdes, em particular, oferecem múltiplos benefícios: além de funcionarem como uma camada de isolamento térmico, retardam o aquecimento da cobertura e contribuem para o resfriamento

evaporativo, impactando positivamente o conforto interno e a qualidade do ar (BERALDO, 2006).

O sistema Wood Frame, por sua flexibilidade de projeto, facilita a implementação de grandes vãos e aberturas, otimizando a captação de luz e ventilação. A precisão do sistema construtivo também permite a instalação de esquadrias de alto desempenho com excelente vedação, garantindo que a ventilação ocorra de forma controlada, através das aberturas projetadas para esse fim, e não por frestas indesejadas (FRIEDMANN, 2019).

Além do conforto térmico, a ventilação é essencial para garantir a qualidade do ar interior (QAI). A renovação do ar remove poluentes internos, como compostos orgânicos voláteis (COVs) e excesso de CO₂, além de controlar a umidade, prevenindo o surgimento de mofo e bolor. A NBR 15575 também estabelece taxas mínimas de renovação de ar para garantir a salubridade dos ambientes (LIMA; SOUZA, 2020).

O desempenho das esquadrias é um fator determinante tanto para a iluminação e ventilação quanto para o isolamento. Parâmetros como o Fator U (transmitância térmica) e o Fator Solar (SHGC) quantificam a performance de um conjunto de vidro e caixilho. A escolha de esquadrias de alto desempenho é um investimento que impacta diretamente o conforto e a eficiência energética da edificação (ALLEN; THALLON, 2011).

O conforto adaptativo, teoria desenvolvida a partir de estudos de campo, sugere que a satisfação das pessoas com o ambiente térmico aumenta quando elas têm controle sobre ele. A possibilidade de abrir e fechar janelas, ajustar persianas ou ligar um ventilador dá aos usuários um papel ativo na gestão do seu próprio conforto, tornando-os mais tolerantes a variações de temperatura (KUCHEN; FISCH, 2009).

A forma e o volume da edificação influenciam diretamente o seu potencial para iluminação e ventilação natural. Edifícios mais compactos têm menor área de superfície em relação ao seu volume, o que é bom para a conservação de energia, mas pode dificultar a iluminação e a ventilação cruzada. Projetos mais delgados ou com pátios internos podem otimizar o acesso à luz e ao vento para todos os ambientes (GURGEL, 2012).

O desafio do ofuscamento (ou glare) é um efeito colateral comum de projetos com grandes áreas envidraçadas. O controle da luz direta, através de brises, persianas internas ou externas, ou mesmo pelo uso de vidros translúcidos, é essencial para garantir o conforto visual e permitir que os ocupantes desfrutem dos benefícios e estratégias bioclimáticas, ao otimizarem a interação da edificação com o clima, têm como consequência direta a redução da necessidade de sistemas de climatização artificial. Esta redução da demanda é o primeiro e mais importante passo para se alcançar a Eficiência Energética, um conceito mais amplo que abrange não apenas o projeto da envoltória, mas também a performance dos equipamentos, o ciclo de vida dos materiais e a relação entre o consumo do edifício e a matriz energética. O próximo tópico aprofundará esta discussão, conectando o conforto térmico ao uso racional de energia e à sustentabilidade em uma escala mais ampla.ios da luz natural sem desconforto (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

2.4.5.1 Eficiência Energética e o Ciclo de Vida

A eficiência energética em edificações é um tema de crescente relevância, impulsionado tanto pela necessidade de reduzir os custos operacionais quanto pela preocupação com a sustentabilidade. A Lei de Eficiência Energética (Lei nº 10.295/2001) e programas como o PROCEL estabelecem padrões mínimos de eficiência para equipamentos, incentivando a indústria e os consumidores a adotarem tecnologias mais eficientes (COSTA et al., 2021).

A climatização é um dos principais fatores de consumo elétrico em edificações residenciais. Portanto, o estudo e a aplicação de medidas que reduzam a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial, sem afetar o conforto dos usuários, são fundamentais para diminuir o consumo global de energia. Um bom projeto da envoltória é a primeira e mais importante linha de defesa contra o consumo excessivo (CHEPP; GASPARIN, 2019).

O conceito de eficiência energética não se resume a reduzir o consumo, mas sim a obter o mesmo serviço (conforto, iluminação) com um menor dispêndio de energia. Isso envolve o uso racional e inteligente dos recursos, combinando estratégias passivas, como as já mencionadas, com tecnologias ativas eficientes,

como o uso de painéis solares para aquecimento de água ou geração de eletricidade (MOURA; MOTTA, 2013).

O gasto com energia elétrica representa uma parcela significativa dos custos de uma habitação ao longo de sua vida útil. Por isso, a busca pela eficiência energética tornou-se um fator preponderante tanto em projetos residenciais quanto comerciais, influenciando as decisões de compra e valorizando imóveis que demonstram melhor desempenho (CORREA et al., 2021).

A análise do ciclo de vida (ACV) oferece uma visão completa da eficiência energética e do impacto ambiental de uma edificação. A ACV considera a energia embutida nos materiais (da extração à construção), a energia operacional (durante o uso) e a energia gasta na demolição e descarte. Sistemas que utilizam materiais de baixa energia embutida e são projetados para alta eficiência operacional apresentam um desempenho superior sob essa ótica holística (OLIVEIRA, 2016).

A eficiência energética também está ligada à redução de outros consumos. Estratégias para o uso racional da energia frequentemente envolvem a otimização dos sistemas de iluminação, a redução do consumo de água quente e a especificação de equipamentos de refrigeração e outros eletrodomésticos mais eficientes. É uma abordagem sistêmica que visa diminuir a pegada de recursos da edificação como um todo (CASTRO, 2015).

Embora a eficiência energética traga inúmeros benefícios, é importante reconhecer os impactos ambientais da própria geração de energia. A construção de grandes hidrelétricas pode causar significativos impactos sociais e ambientais, enquanto as termelétricas contribuem para a emissão de gases de efeito estufa. Portanto, a estratégia mais sustentável é sempre a de reduzir a demanda na ponta, ou seja, no consumo final das edificações (CHAVES, 2018).

A integração de fontes de energia renovável na própria edificação, como painéis fotovoltaicos, é uma estratégia proativa que não apenas reduz a dependência da rede, mas também transforma o edifício de um mero consumidor em um potencial gerador de energia, alinhando-se aos conceitos de edificações de energia zero (ou quase zero) (MOURA; MOTTA, 2013).

Estudos de caso, como o de Nogueira (2019), demonstram na prática o potencial da economia. A substituição de sistemas de iluminação e aquecimento por tecnologias mais modernas e eficientes, como lâmpadas LED e sistemas

termossolares, pode resultar em reduções consideráveis no consumo de energia, comprovando a viabilidade e o retorno do investimento em eficiência.

O comportamento do usuário tem um impacto profundo e muitas vezes subestimado no consumo de energia. Mesmo a edificação mais eficiente pode ter um alto consumo se operada de forma inadequada. Programas de conscientização e a disponibilização de informações claras sobre o funcionamento do edifício são cruciais para que os moradores possam utilizar seus recursos de forma otimizada (DUARTE, 2016).

2.4.6 O potencial do Wood Frame na geração de créditos de Carbono

Diferentemente dos sistemas construtivos de base mineral, o Wood Frame se posiciona de forma única e vantajosa na equação dos créditos de carbono, atuando não como um emissor líquido, mas como um potencial agente de remoção e armazenamento de dióxido de carbono da atmosfera. Esta capacidade deriva diretamente da natureza de seu principal material estrutural: a madeira. Através do fenômeno do sequestro de carbono biogênico, o sistema Wood Frame não apenas possui um carbono embutido significativamente menor, mas também incorpora um "crédito" de carbono intrínseco, que pode ser quantificado e, potencialmente, monetizado nos mercados de carbono voluntários.

O mecanismo central é a fotossíntese. Durante seu crescimento, as árvores absorvem CO_2 da atmosfera e, através de processos biológicos, convertem o carbono em celulose e lignina, que compõem sua biomassa. Aproximadamente 50% da massa seca da madeira é constituída por carbono. Quando essa madeira, proveniente de florestas manejadas de forma sustentável, é colhida e utilizada na estrutura de um edifício, esse carbono fica fisicamente estocado, sendo efetivamente removido da atmosfera durante toda a vida útil da construção. O edifício transforma-se, assim, em um reservatório de carbono de longa duração (long-term carbon sink), um conceito fundamental para as estratégias de descarbonização do setor (Churkina et al., 2020).

A quantificação desse benefício é relativamente direta: cada metro cúbico de madeira utilizada na construção armazena aproximadamente uma tonelada de CO_2 equivalente, que foi retirada da atmosfera. Este valor representa um balanço

negativo de emissões. Quando se realiza uma Análise de Ciclo de Vida (ACV), o carbono embutido (emissões da colheita, transporte e processamento da madeira) é subtraído do carbono biogênico sequestrado. Em muitos casos, o resultado é uma pegada de carbono líquida negativa para o componente estrutural, significando que o sistema removeu mais carbono do que emitiu para ser produzido, um feito inalcançável para o concreto e o aço.

A conversão desse carbono armazenado em créditos de carbono comercializáveis é um processo mais complexo, que depende de metodologias de verificação rigorosas e do princípio da adicionalidade. Para que um projeto de construção em madeira seja elegível, é preciso demonstrar que a escolha deste sistema evitou emissões que ocorreriam em um cenário base (business-as-usual), que seria, tipicamente, uma construção em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. A diferença entre a pegada de carbono total (embutido - sequestrado) do projeto em Wood Frame e a pegada de carbono do cenário base em concreto/alvenaria representa a quantidade de emissões evitadas, que pode ser certificada e vendida como créditos de carbono.

Em conclusão, o sistema Wood Frame representa uma das mais poderosas estratégias disponíveis para a descarbonização da construção civil. Ele atua em três frentes: substitui materiais de alta emissão (cimento e aço), reduz o carbono embutido devido ao menor consumo de energia em seu processamento e, crucialmente, remove e armazena CO₂ da atmosfera. Esta tripla vantagem não apenas posiciona o Wood Frame como uma solução alinhada às metas climáticas globais, mas também abre uma via promissora para que projetos de edificação possam participar ativamente dos mercados de carbono, transformando um benefício ambiental em um potencial ativo financeiro.

A revisão da literatura evidencia uma distinção teórica clara entre a alta inércia térmica da alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o alto desempenho de isolamento do sistema Wood Frame. Embora a teoria aponte para performances distintas, a comprovação de sua eficácia em condições reais de uso no contexto brasileiro, sob a égide da NBR 15.575, demanda uma investigação empírica rigorosa. Diante deste cenário, o próximo capítulo descreve em detalhes os Materiais e Métodos empregados para traduzir estas questões teóricas em um experimento de campo, detalhando a caracterização dos objetos de estudo, a

instrumentação utilizada e os procedimentos adotados para a coleta e análise dos dados que formarão o cerne desta tese.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção descreve detalhadamente o delineamento metodológico adotado para a condução desta pesquisa, abrangendo a caracterização dos objetos de estudo, os procedimentos para instrumentação e coleta de dados, e as técnicas estatísticas empregadas para a análise e interpretação dos resultados.

3.1 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A presente pesquisa foi delineada sob uma abordagem quantitativa e comparativa, com o escopo de avaliar e contrastar o desempenho de conforto térmico de duas edificações reais, ou estudo de pós ocupação. O estudo foi configurado como uma análise de amostras pareadas, onde duas unidades habitacionais, representativas dos sistemas construtivos de Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e Wood Frame, foram monitoradas simultaneamente sob as mesmas condições climáticas externas. Este delineamento experimental foi escolhido para neutralizar a influência de variáveis ambientais e de orientação, permitindo que a análise se concentrasse exclusivamente na diferença de desempenho térmico intrínseco a cada sistema construtivo.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS OBJETOS DE ESTUDO

Para garantir a validade e a comparabilidade dos dados, foram selecionados dois apartamentos com características espaciais e de orientação solar análogas, situados na mesma cidade, porém em condomínios distintos. A principal variável de diferenciação entre os objetos de estudo é o seu sistema construtivo.

A escolha do local para a realização de estudos experimentais em conforto térmico e desempenho de edificações é um fator determinante para a validade e a aplicabilidade dos resultados. Para a presente pesquisa, a cidade de Cascavel, localizada na região Oeste do estado do Paraná, foi selecionada como área de estudo. Esta escolha se justifica por suas características climáticas representativas e por seu papel como um polo de desenvolvimento regional, cuja expansão urbana

contínua demanda soluções construtivas cada vez mais eficientes e adaptadas às condições locais.

Situada a uma latitude de aproximadamente 24°57' Sul e uma longitude de 53°27' Oeste, com uma altitude média de 781 metros acima do nível do mar, Cascavel possui um clima classificado, segundo a tipologia de Köppen-Geiger, como Cfa - Clima Subtropical Úmido Mesotérmico. Esta classificação se traduz em verões quentes, com temperaturas médias que frequentemente ultrapassam os 28°C, e invernos frios, com ocorrência de geadas e temperaturas que podem se aproximar de 0°C, embora a ocorrência de neve seja rara (ALVARES et al., 2013). Esta amplitude térmica sazonal significativa oferece um campo de provas ideal para a avaliação do desempenho de diferentes sistemas construtivos, submetendo-os tanto a rigorosos requisitos de resfriamento passivo no verão quanto de aquecimento e retenção de calor no inverno.

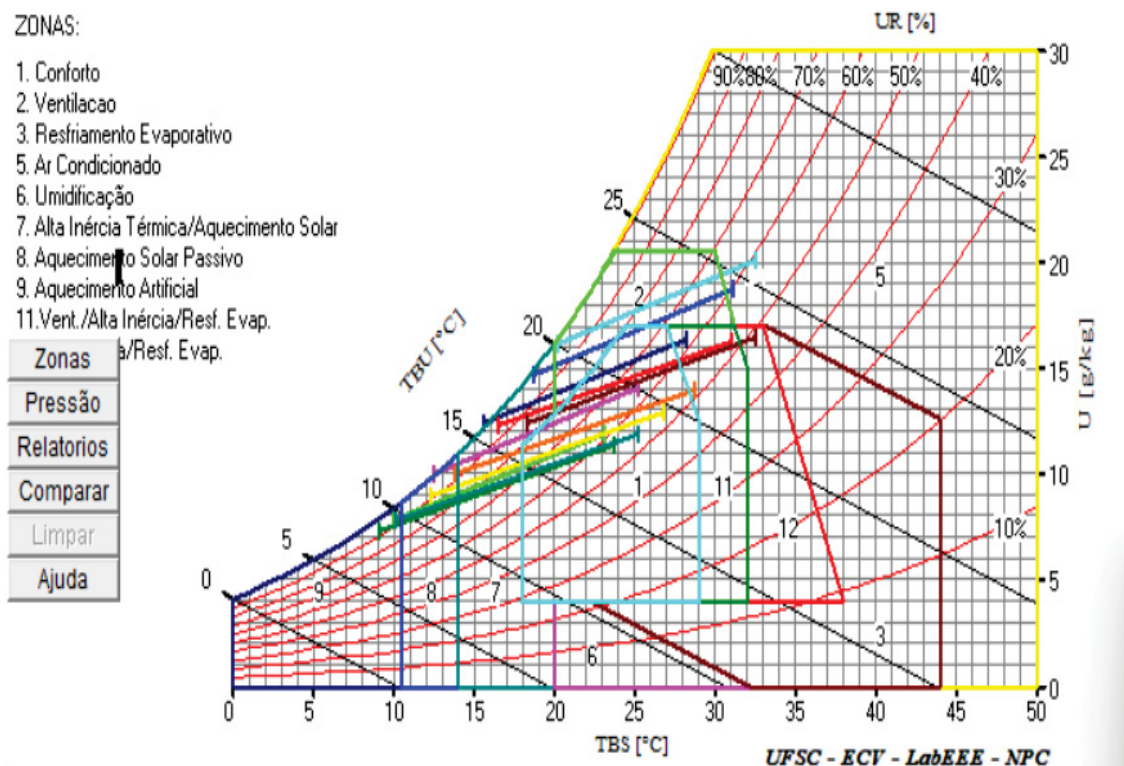
Do ponto de vista normativo, Cascavel está inserida na Zona Bioclimática 2, conforme definido pela norma brasileira ABNT NBR 15.220-3 (ABNT, 2005). Esta zona é caracterizada por verões quentes e invernos relativamente frios, com uma alta umidade relativa do ar durante grande parte do ano. As diretrizes de projeto recomendadas para esta zona bioclimática enfatizam a necessidade de estratégias mistas: no verão, a prioridade é a ventilação cruzada para resfriamento e o sombreamento das aberturas para evitar o ganho de calor excessivo; no inverno, as estratégias devem focar no aproveitamento da radiação solar para aquecimento passivo e na vedação adequada para minimizar as perdas térmicas.

A dinâmica urbana de Cascavel também reforça sua relevância como área de estudo. Com uma população que ultrapassa 330 mil habitantes, a cidade é um dos principais centros econômicos do Oeste paranaense, apresentando um setor da construção civil pujante e em constante expansão (IBGE, 2021). Este crescimento gera uma demanda contínua por novas habitações, tornando a discussão sobre a eficiência e o desempenho dos sistemas construtivos uma pauta de grande importância para o desenvolvimento sustentável local. A análise comparativa entre a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, sistema predominante na região, e o Wood Frame, uma alternativa inovadora, insere-se diretamente neste contexto de busca por práticas construtivas mais alinhadas às necessidades climáticas e ambientais contemporâneas.

como a carta psicrométrica. Este diagrama gráfico, fundamental para a arquitetura bioclimática (GIVONI, 1992), permite a plotagem simultânea da temperatura de bulbo seco e da umidade do ar, caracterizando o estado termodinâmico do ambiente externo ao longo do ano. Sobre esta base climática, projeta-se a zona de conforto térmico, uma área poligonal cujos limites são definidos pela complexa interação dos seis parâmetros fundamentais — quatro ambientais (temperatura do ar, umidade, velocidade do ar e temperatura radiante média) e dois pessoais (nível de vestimenta e taxa metabólica), conforme estabelecido pela ASHRAE Standard 55 (2020). A sobreposição dos dados climáticos de Cascavel a esta zona de conforto permite diagnosticar com precisão as necessidades sazonais de aquecimento e resfriamento, e, mais importante, quantificar o potencial de estratégias passivas como a ventilação natural, o resfriamento evaporativo e o aquecimento solar passivo para trazer as condições ambientais para dentro dos limites de conforto. Portanto, a carta psicrométrica não apenas descreve o clima, mas também prescreve as estratégias bioclimáticas mais eficazes para o local, estabelecendo a linha de base fundamental contra a qual o desempenho térmico dos protótipos em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e Wood Frame será rigorosamente avaliado.

Para uma análise bioclimática detalhada e representativa das condições da região Oeste do Paraná, apresenta-se na Figura 7 a Carta Psicrométrica Bioclimática da cidade de Foz do Iguaçu. A escolha deste município como referência se deve à maior disponibilidade e robustez de sua série histórica de dados climáticos, tanto nas bases do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) quanto nos arquivos climáticos utilizados por ferramentas de análise consagradas. A carta foi gerada utilizando o software AnalysisBIO 2.2, desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da UFSC, que processa esses dados para visualizar graficamente as condições de temperatura e umidade ao longo do ano e sobrepô-las às diferentes estratégias bioclimáticas. Desta forma, embora o estudo seja conduzido em Cascavel, a utilização da carta de Foz do Iguaçu oferece um diagnóstico bioclimático mais preciso e estatisticamente significativo para a região, fundamentando a avaliação das estratégias de projeto e do desempenho térmico dos protótipos em um cenário climático de alta confiabilidade.

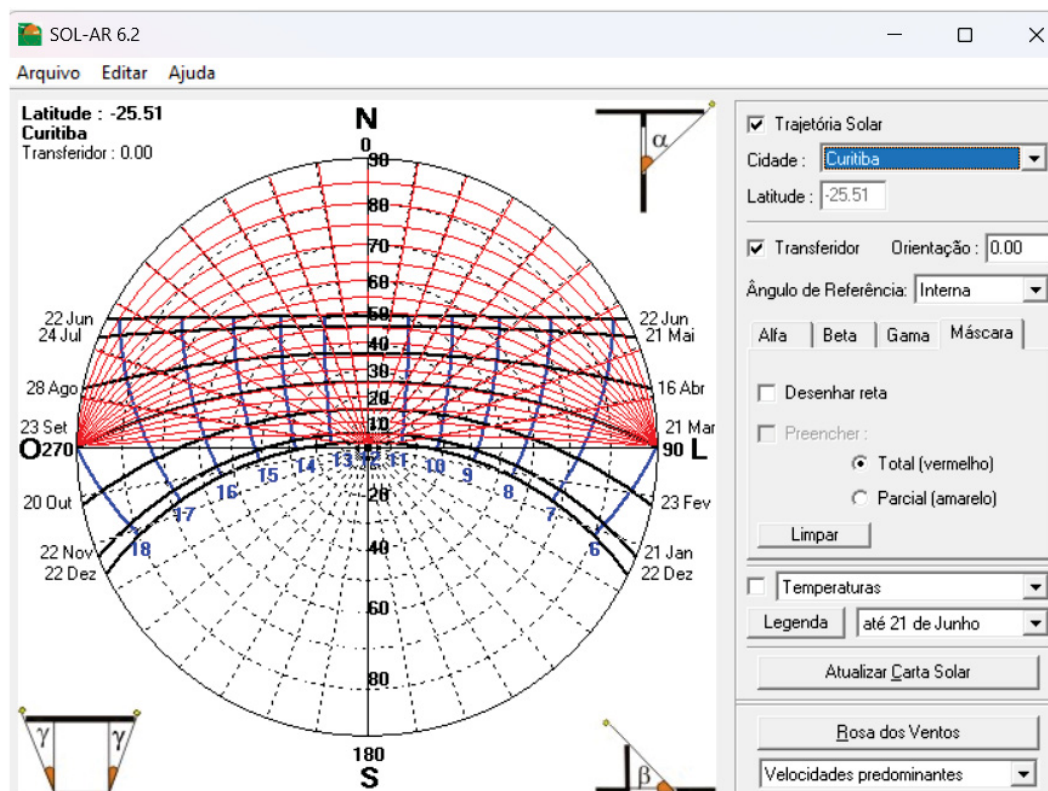
FIGURA 7 – Carta Psicrométrica Bioclimática



FONTE: AnalysisBIO 2.2, (LabEEE) , elaborado pelo autor (2025).

Complementarmente à análise das condições termodinâmicas do ar, o estudo da geometria solar é indispensável para o desenvolvimento de estratégias eficazes de sombreamento e de aquecimento passivo. Para este fim, apresenta-se na Figura Y a Carta Solar gerada para a cidade de Curitiba, a localidade mais próxima da área de estudo com dados pré-configurados no software AnalysisSOL (LabEEE/UFSC). Este diagrama mapeia a trajetória aparente do sol no céu, indicando seus ângulos de altitude e azimute ao longo do ano. Apesar da sutil diferença de latitude entre as cidades, a carta solar de Curitiba oferece uma base analítica robusta e suficientemente precisa para a definição dos princípios de orientação solar e para o dimensionamento dos elementos de proteção, como beirais e brises, que serão aplicados aos protótipos.

FIGURA 8 – Carta Solar



FONTE: AnalysisSOL (LabEEE/UFSC), elaborado pelo autor (2025).

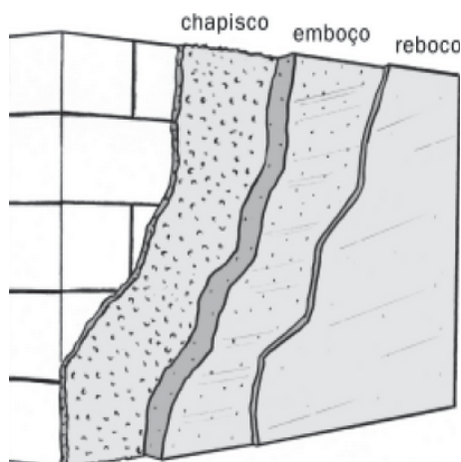
Portanto, a caracterização da área de estudo para esta tese se constitui a partir de uma abordagem multicamadas: o contexto real de Cascavel define a relevância e o campo experimental da pesquisa, enquanto as análises bioclimática e solar, baseadas nos dados mais robustos disponíveis de Foz do Iguaçu e Curitiba, respectivamente, fornecem a fundamentação técnica e científica para o projeto e a avaliação de desempenho. Esta combinação metodológica garante que as conclusões do estudo sejam embasadas tanto em condições empíricas quanto em uma análise climática de alta confiabilidade. Firmado este arcabouço contextual e climático, passa-se agora à apresentação detalhada dos dois sistemas construtivos que serão objeto da análise comparativa: a edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e a edificação em Wood Frame.

3.2.1 Edificação em Wood Frame

A unidade de estudo para este sistema é um apartamento localizado no Di Napoli Residencial. O imóvel selecionado situa-se no 2º andar, com a fachada

principal de análise (dormitório) voltada para a orientação Oeste. Este sistema construtivo é caracterizado por uma estrutura leve de perfis de madeira (light wood framing), com painéis de OSB (Oriented Strand Board) para contraventamento, preenchimento das cavidades com isolante térmico (lã de vidro/rocha) e fechamentos internos em gesso acartonado (drywall).

FIGURA 9– Esquema de Alvenaria Convencional



FONTE: VASQUES (2014).

FIGURA 10 – Esquema de Wood Frame



FONTE: DUARTE (2016).

FIGURA 11 – Descrição do Wood Frame

WOOD FRAME

Composição de materiais com a função estrutural de isolamento térmico-acústico, vedação e acabamento.

- 1- Painel Estruturado
- 2- Isolamento térmico-acústico
- 3- OSB
- 4- Membrana hidrófuga
- 5- Placa cimentícia
- 6- Placa de gesso acartonado
- 7- Acabamento

FONTE: DUARTE (2016).

FIGURA 12 – Estrutura em Wood Frame



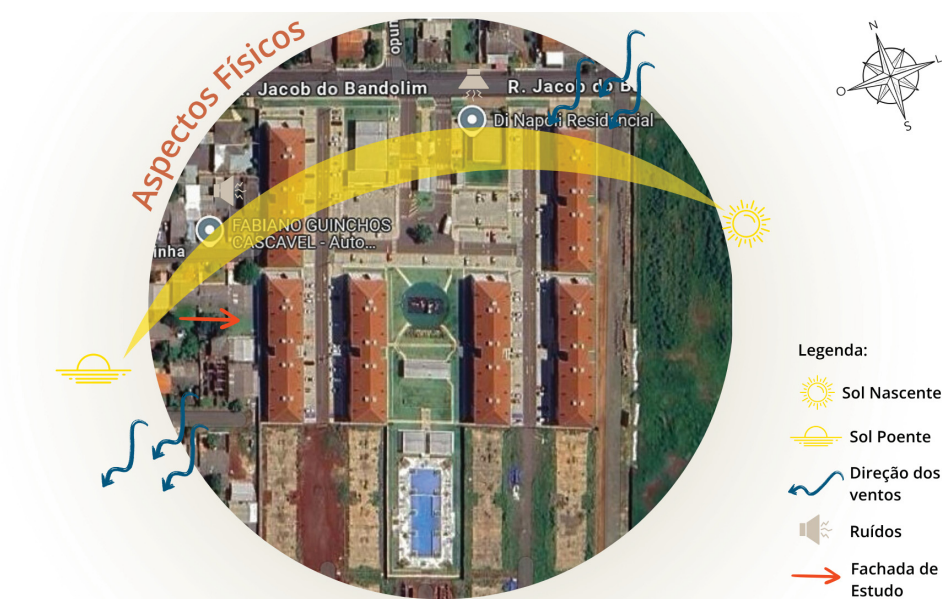
FONTE: Autor (2022).

FIGURA 13 – Exemplo da estrutura de um apartamento modelo do objeto de estudo em fase da obra



FONTE: Autor (2022).

FIGURA 14 – Local do estudo, Condicionantes



FONTE: Autor (2025).

3.2.2 Edificação em Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico

A unidade de referência para o sistema tradicional está localizada no Condomínio Residencial Águas Claras, no bairro Neva. De forma análoga, o apartamento selecionado também se encontra no 2º andar e possui a mesma orientação da fachada Oeste. Este sistema é composto por uma estrutura reticulada de concreto armado (pilares, vigas e lajes) e vedações externas e internas em alvenaria de tijolos cerâmicos com revestimento em argamassa.

FIGURA 15 – Alvenaria Convencional



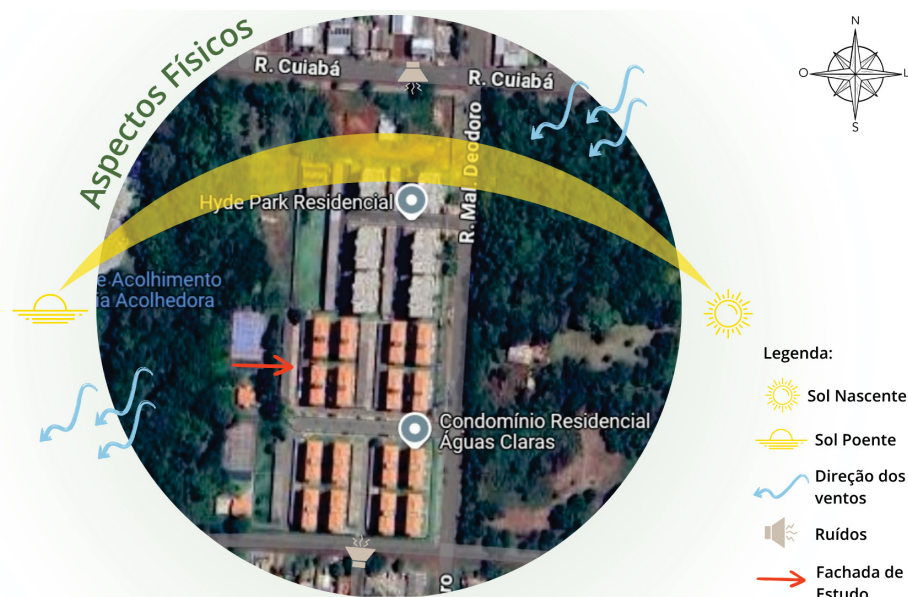
FONTE: Google (2025).

Figura 16 – Detalhe Alvenaria Convencional



FONTE: Google (2025).

Figura 17 – Local do estudo, Aspectos físicos



FONTE: Autor (2025).

A escolha deliberada por unidades no segundo andar com a mesma orientação solar (Oeste) foi um critério rigoroso para garantir a isonomia da análise. Esta seleção mitiga variáveis de confusão, como o ganho ou perda de calor pela cobertura (que impactaria unidades do último andar) e o sombreamento ou umidade do solo (que impactaria o térreo). A orientação Oeste foi particularmente escolhida por representar um cenário crítico de ganho de calor no período da tarde, tornando o teste de desempenho térmico mais exigente para ambos os sistemas.

3.3 INSTRUMENTAÇÃO E COLETA DE DADOS

O monitoramento contínuo das variáveis termo-higrométricas foi realizado com o auxílio de termo-higrômetros digitais marca - DT-322 - CEM , implementado através de um sistema de coleta de dados totalmente automatizado. Para cada um dos dois apartamentos, foi empregado um conjunto de dois sensores idênticos, previamente calibrados e posicionados estrategicamente para capturar os dados de interesse. O Sistema de coleta foi feito por um microcontrolador Arduino, programado para orquestrar as medições e o armazenamento. Para garantir a coleta pontual e automática de hora em hora, foi integrado um Módulo de Relógio de Tempo Real (RTC, modelo DS3231), que fornecia um carimbo de data e hora exato para cada registro. No início de cada hora, o Arduino acionava os sensores para ler os valores de temperatura e umidade, formatava esses dados em um padrão CSV (Data, Hora, Temperatura_C, Umidade_%) e os salvava em um cartão SD. Essa configuração permitiu a criação de um registro histórico contínuo e autônomo, assegurando medições precisas e consistentes para posterior análise.

Termohigrômetro (Sensor): Mede a temperatura e a umidade do ambiente.

FIGURA 18 – Termo Higrômetro Digital - DT-322 - CEM



FONTE: Google (2025).

Arduino (Microcontrolador). Programado uma única vez (usando um computador) para “dizer” a ele o que fazer. Depois disso, ele executa esse programa

para sempre, toda vez que for ligado. Só precisa programar novamente, se cair a energia elétrica.

FIGURA 19 – Arduino/Microcontroladora



FONTE: Google (2025).

Relógio RTC. Ele tem sua própria bateria e informa ao Arduino a data e a hora exatas, mesmo que o Arduino seja desligado e ligado novamente.

FIGURA 20 – Real Time Clock RTC DS3231 | AutoCore Robótica -Arduino



FONTE: Google (2025).

Módulo de Cartão SD , esse elemento é como se fosse o "caderno de anotações" do sistema. Pois é nele que os dados ficam armazenados.

FIGURA 21 – Cartão de Memória MicroSD 16GB com Adaptador SD | Goldentec



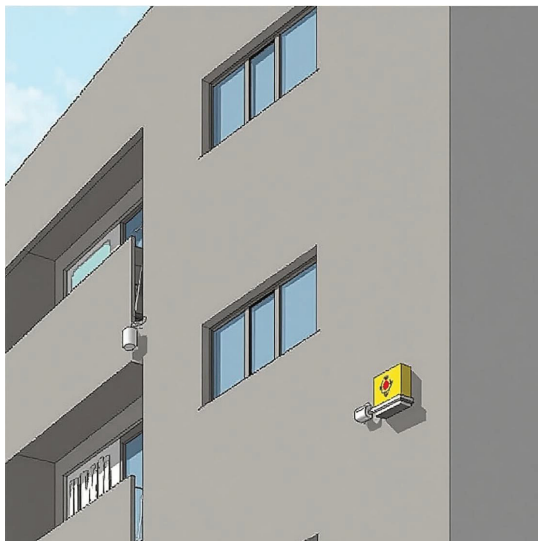
FONTE: Google (2025).

3.3.1 Posicionamento dos Sensores

3.3.1.1 Sensor Externo

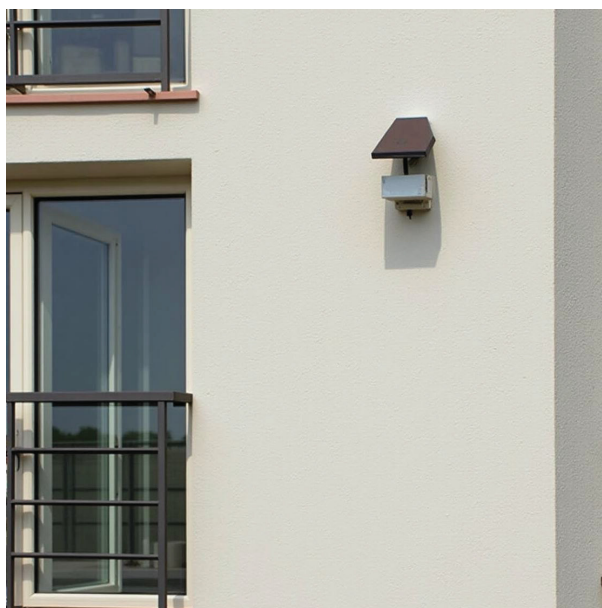
Um termo-higrômetro foi instalado na face externa da parede de estudo (fachada Oeste de cada apartamento), a uma altura de aproximadamente 1,5 metros do piso da sacada. O sensor foi acondicionado dentro de um abrigo meteorológico improvisado (mini-abrigo) para protegê-lo da radiação solar direta e da precipitação, garantindo que as medições de Temperatura Externa (°C) e Umidade Relativa Externa (%) refletissem as condições do ar adjacente à fachada, sem interferências.

FIGURA 22 – Disposição externa no edifício de Alvenaria Convencional



FONTE: Autor (2025).

FIGURA 23 – Disposição externa no edifício em Wood Frame



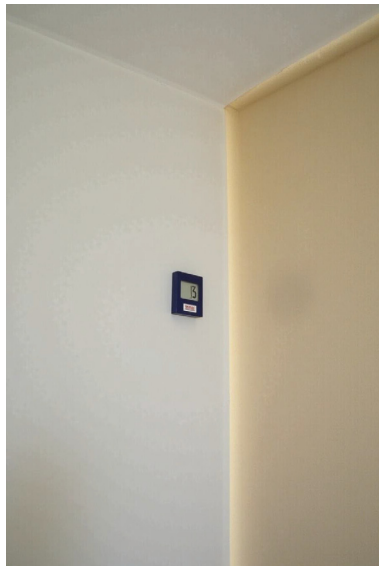
FONTE: Autor (2025).

3.3.1.2 Sensor Interno

O segundo termo-higrômetro foi posicionado na face interna da mesma parede de estudo, dentro do dormitório, a uma altura de 1,5 metros do piso. O sensor foi mantido afastado de fontes diretas de calor (como equipamentos

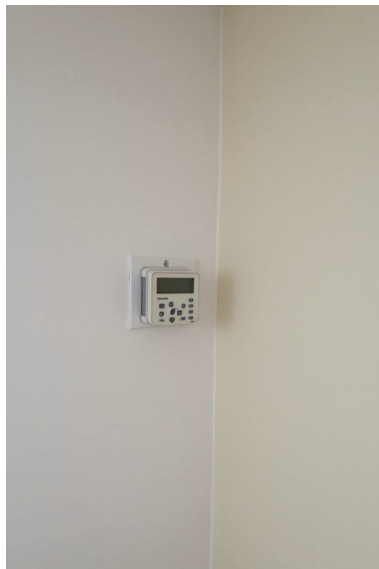
eletrônicos) e da incidência solar direta através das janelas, para registrar de forma fidedigna a Temperatura Interna ($^{\circ}\text{C}$) e a Umidade Relativa Interna (%) do ambiente.

FIGURA 24 - Disposição interna no edifício de Alvenaria Convencional



FONTE: Autor (2025).

FIGURA 25 - Disposição interna no edifício Em Wood Frame



FONTE: Autor (2025).

3.3.3 Procedimiento de Coleta

O procedimento de coleta de dados foi rigorosamente planejado para garantir a comparabilidade, a representatividade e a validade estatística das informações obtidas. O processo envolveu a programação dos equipamentos, a definição dos períodos de monitoramento e a estruturação da base de dados.

Os termo-higrômetros digitais, utilizados em ambos os locais de estudo, foram configurados para registrar as variáveis de temperatura e umidade relativa (interna e externa) em intervalos regulares e constantes de 1 (uma) hora. A escolha desta frequência horária foi uma decisão metodológica deliberada, visando equilibrar a necessidade de detalhamento com a viabilidade da análise. Este intervalo é suficientemente curto para capturar a dinâmica das flutuações térmicas diárias, incluindo os picos de temperatura vespertinos, sem gerar um volume de dados excessivo ou redundante. Fundamentalmente, a medição em horas exatas (como, 08:00, 09:00, 10:00) permitiu a criação de um conjunto de dados perfeitamente pareado, condição indispensável para a análise estatística comparativa.

A coleta de dados foi programada para abranger as quatro estações do ano, com medições realizadas durante períodos representativos de cada uma, de forma a submeter os sistemas construtivos a um espectro variado de condições climáticas.

As datas foram escolhidas para ocorrer em períodos onde as características de cada estação estão plenamente estabelecidas, evitando os dias imediatamente próximos aos equinócios e solstícios, que podem apresentar maior instabilidade climática. Esta abordagem busca capturar a performance em cenários típicos e não em momentos de transição abrupta, conforme preconizado por estudos de desempenho de edificações (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Verão (13-14 de Janeiro): O período está no auge da estação, aproximadamente um mês após o solstício de verão. Esta época do ano é consistentemente caracterizada pelas mais altas temperaturas médias e maior intensidade de radiação solar, representando o cenário mais crítico para o ganho de

calor. A avaliação do desempenho sob estas condições é fundamental para verificar a eficácia das estratégias de proteção solar e isolamento (GURGEL, 2012).

Inverno (15-16 de Julho): De forma análoga, meados de julho situa-se no ápice do inverno, um mês após o solstício de inverno. Este período, que historicamente registra as menores temperaturas médias anuais, é ideal para avaliar a capacidade das edificações em reter calor e resistir a perdas térmicas para o exterior, um indicador direto da qualidade da envoltória (SILVA et al., 2018).

Outono (05-06 de Maio) e Primavera (07-08 de Outubro): Estas datas foram selecionadas para representar o "meio" das estações de transição. Elas ocorrem suficientemente afastadas dos solstícios e equinócios para refletir as características típicas dessas estações, como a grande amplitude térmica diária. Este cenário é ideal para testar a capacidade de moderação e estabilização térmica dos sistemas, um aspecto central do conforto adaptativo (KUCHEN; FISCH, 2009).

Antes da realização das medições, foi realizada uma consulta às normais climatológicas (médias históricas de 30 anos) para a região de estudo, disponibilizadas por órgãos como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As datas selecionadas correspondem a períodos em que os dados históricos apontam para condições de temperatura, umidade e insolação que são estatisticamente representativas da média esperada para aquele mês. A intenção foi evitar a coleta de dados durante eventos climáticos extremos e atípicos, que poderiam distorcer a análise do desempenho "normal" da edificação, uma recomendação padrão para garantir a validade externa de estudos de caso (CHEPP; GASPARIN, 2019).

Após a coleta, os dados de temperatura externa registrados pelos próprios equipamentos foram comparados com os registros de estações meteorológicas oficiais para o mesmo período, validando as condições de contorno do experimento. A análise confirmou que as condições durante os dias de medição foram, de fato, consistentes com o esperado para a estação, sem anomalias climáticas severas (como frentes frias inesperadas no verão ou veranicos no inverno), garantindo a relevância da amostra coletada (MOLAR-OROZCO et al., 2020). Por exemplo, nos dias 13 e 14 de janeiro, os picos de temperatura externa registrados pelos equipamentos da pesquisa foram corroborados pelos registros do Simepar, caracterizando um dia típico de verão. Nos dias 15 e 16 de julho, as temperaturas externas mínimas, próximas a 10°C, estavam em conformidade com os dados

históricos do INMET e os registros do Simepar para o período, representando um cenário de inverno para a região.

3.4 PROCEDIMENTOS PARA ANÁLISE DE DADOS

A análise dos dados coletados foi executada em três etapas sequenciais e complementares, progredindo de uma caracterização geral para uma validação estatística e modelagem.

Análise Estatística Descritiva, esta etapa inicial consistiu em sumarizar e comparar as características primordiais do desempenho térmico de cada sistema para cada estação do ano. Foram calculadas as seguintes métricas para a variável Temperatura Interna ($^{\circ}\text{C}$).

O cálculo da Média para determinar o comportamento térmico predominante e da Mediana como medida robusta. A média seria a soma de todas as temperaturas registradas, dividida pelo número de registros. É o famoso "valor médio". Serve para determinar a temperatura predominante ou o comportamento térmico geral de cada sistema. Por exemplo: "Em média, o Sistema A manteve uma temperatura de 24°C no verão, enquanto o Sistema B manteve 26°C ."

Já a Mediana serve para ordenar todas as suas leituras de temperatura da mais baixa para a mais alta, a mediana é o valor que está exatamente no meio. 50% das leituras estão abaixo dela e 50% estão acima. A mediana é uma medida mais "honesta" e robusta do que a média quando há valores extremos. Ela representa melhor a experiência térmica real, ignorando anomalias pontuais (como uma porta aberta por um tempo, causando uma queda brusca de temperatura). Exemplo: Se a mediana do Sistema A (24.5°C) for muito diferente da média (26°C), isso indica que houve alguns picos de calor que "inflaram" a média, mas que, na maior parte do tempo, a temperatura ficou mais próxima de 24.5°C . gráfico a

O cálculo do Desvio Padrão (DP) como principal indicador de estabilidade térmica (menor DP indica maior estabilidade), e dos valores de Mínimo, Máximo e Amplitude Térmica como indicadores secundários de variabilidade. Usando o Excel DESVPAD.P (P de População). Usado para representar o grupo inteiro de dados que foram levantados e que estão sendo analisados.

A Análise Estatística Inferencial foi usada para validar se as diferenças observadas na etapa descritiva eram estatisticamente significativas, foi empregado o Teste t, para Amostras Pareladas. Este método foi utilizado para comparar as médias da Temperatura Interna dos dois sistemas em cada estação. As hipóteses foram testadas com um nível de significância (α) de 0.05. A rejeição da Hipótese Nula (com valor-p < 0.05) foi considerada como evidência estatística da existência de uma diferença real de desempenho.

A manipulação dos dados, a execução dos cálculos estatísticos e a elaboração dos elementos gráficos foram realizadas com o auxílio dos softwares Microsoft Excel para organização e análise descritiva, e de softwares estatísticos. Os resultados foram sintetizados e apresentados por meio de tabelas, gráficos de linhas e de dispersão, visando a uma comunicação clara, precisa e visualmente clara para os achados da pesquisa.

O tratamento dos dados iniciou-se com o cálculo de métricas descritivas, como a média de temperatura, para cada uma das edificações (protótipos) em cada estação analisada. Esta etapa permitiu a caracterização do comportamento térmico predominante de cada sistema construtivo e sua resposta às flutuações da temperatura externa.

Posteriormente, realizou-se uma análise comparativa direta do desempenho térmico entre as duas edificações. Os resultados de temperatura interna de cada protótipo foram confrontados com o objetivo de determinar qual sistema construtivo demonstrou maior capacidade de atenuação das variações térmicas externas. A avaliação final do desempenho de cada sistema foi realizada à luz dos critérios estabelecidos pela Norma de Desempenho ABNT NBR 15575, verificando-se o atendimento aos níveis mínimo, intermediário ou superior de conforto térmico.

Essa metodologia proporcionou uma base para a análise comparativa entre edificações convencionais e em Wood Frame, considerando os parâmetros de conforto térmico, de acordo com a Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575.

3.5 LIMITAÇÕES DO ESTUDO

A pesquisa não controlou a abertura de janelas, uso de cortinas ou presença de ocupantes, que pode influenciar nos resultados. Os resultados são específicos

para a zona bioclimática de Palotina (ou da cidade onde foi feito o estudo). A replicação em outros climas é recomendada. Os resultados são específicos para aqueles dois edifícios. Pequenas variações na qualidade da execução ou nos materiais (tipo de bloco, espessura do isolamento) poderiam alterar os resultados. Adicionalmente, a natureza do estudo, envolvendo o monitoramento de residências ocupadas, impôs desafios operacionais e éticos significativos que influenciaram o delineamento da coleta de dados. A principal dificuldade foi a gestão da privacidade e o incômodo aos moradores. A instalação de equipamentos, mesmo que discretos, e a necessidade de visitas periódicas para a extração dos dados representam uma intrusão no ambiente doméstico. Para mitigar este impacto, foi necessário obter o consentimento informado dos residentes, garantir a confidencialidade dos dados e limitar o número e a duração das visitas, o que, por sua vez, restringiu a possibilidade de realizar medições mais complexas ou instalar uma gama maior de sensores.

Outro desafio prático foi a garantia da integridade dos equipamentos e dos dados. Em um ambiente não controlado como uma residência, os sensores estavam sujeitos a interrupções não planejadas, como o desligamento acidental de fontes de energia, a movimentação dos equipamentos pelos moradores ou falhas técnicas dos dispositivos de armazenamento de dados (cartões SD). Embora tenham sido tomadas medidas preventivas, como o uso de equipamentos com bateria interna e a realização de checagens periódicas, a possibilidade de perda de dados foi um risco constante que exigiu um planejamento cuidadoso e a coleta de dados por períodos ligeiramente mais longos do que o estritamente necessário para assegurar a obtenção de uma amostra robusta.

O tempo de coleta de dados também se configurou como uma limitação prática. O delineamento ideal para um estudo de desempenho térmico envolveria um monitoramento contínuo ao longo de um ano completo para capturar toda a sazonalidade e eventos climáticos atípicos. No entanto, por restrições logísticas, de recursos e, principalmente, pela dificuldade em manter o compromisso dos moradores por um período tão extenso, optou-se por realizar coletas concentradas em períodos representativos de cada estação. Embora esta abordagem seja metodologicamente válida e amplamente utilizada, ela fornece um "retrato" do desempenho em cada estação, e não um "filme" contínuo, o que limita a análise de

fenômenos de mais longo prazo, como a adaptação da edificação a ondas de calor ou frio prolongadas.

Finalmente, a sincronização perfeita dos equipamentos entre os dois locais de estudo, embora almejada, apresentou desafios. Apesar do uso de relógios de tempo real (RTC) nos sistemas de coleta, pequenas discrepâncias de segundos ou minutos entre os registros poderiam ocorrer. Para a análise horária adotada, essa limitação é considerada desprezível. Contudo, ela ressalta a complexidade de se realizar estudos de campo pareados em locais distintos, em contraste com a precisão absoluta que seria possível em um ambiente de laboratório controlado. A superação dessas dificuldades foi parte integrante do processo de pesquisa, e seu reconhecimento é essencial para a correta interpretação dos resultados apresentados.

Tendo estabelecido o robusto delineamento metodológico, desde a criteriosa seleção dos objetos de estudo até os procedimentos detalhados de coleta e análise, a pesquisa encontra-se agora fundamentada para a etapa central desta tese. O capítulo subsequente, Apresentação e Análise dos Resultados, se dedicará a explorar os dados obtidos através do monitoramento in loco. A análise será apresentada de forma progressiva, partindo de uma estatística descritiva que revelará as tendências gerais, passando pela validação inferencial que comprovará a significância dos achados, e culminando em uma análise gráfica que ilustrará o comportamento dinâmico de cada sistema construtivo frente aos desafios climáticos de cada estação.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da análise do desempenho térmico das edificações, conforme a metodologia previamente delineada. Os dados, coletados em períodos representativos de hora em hora por dois dias horas para cada estação do ano, foram processados para revelar o comportamento térmico de cada sistema construtivo em resposta às condições climáticas externas.

A análise se desdobra em duas etapas principais. Primeiramente, são expostos os resultados da estatística descritiva, incluindo as médias de temperatura, que permitem uma caracterização geral e a comparação do desempenho predominante de cada protótipo. Em seguida, os resultados são avaliados de forma comparativa e à luz dos critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 15575, com o objetivo de quantificar e validar a eficiência de cada sistema em proporcionar conforto térmico e estabilidade, determinando seu nível de conformidade normativa.

As figuras abaixo representam os dados levantados conforme descrito na edificação feita em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico.

FIGURA 26 – Dados Alvenaria Convencional - Outono

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA DE ALVENARIA CONVENCIONAL						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
Outono						
2024-05-05	08:00	Outono	18.5	19.5	82	72
2024-05-05	09:00	Outono	20.1	20.4	78	70
2024-05-05	10:00	Outono	22.0	21.8	72	68
2024-05-05	11:00	Outono	23.5	23.2	65	64
2024-05-05	12:00	Outono	24.8	24.3	60	61
2024-05-05	13:00	Outono	25.5	25.1	57	59
2024-05-05	14:00	Outono	26.0	25.8	55	58
2024-05-05	15:00	Outono	25.8	26.0	56	60
2024-05-05	16:00	Outono	25.1	25.5	59	62
2024-05-05	17:00	Outono	24.0	24.8	63	65
2024-05-06	08:00	Outono	17.8	19.0	85	75
2024-05-06	09:00	Outono	19.5	20.1	80	72
2024-05-06	10:00	Outono	21.5	21.7	74	69
2024-05-06	11:00	Outono	23.0	23.0	67	65
2024-05-06	12:00	Outono	24.2	24.1	62	63
2024-05-06	13:00	Outono	25.0	24.9	59	61
2024-05-06	14:00	Outono	25.6	25.5	57	60
2024-05-06	15:00	Outono	25.3	25.6	58	62
2024-05-06	16:00	Outono	24.7	25.1	61	64
2024-05-06	17:00	Outono	23.6	24.4	66	67

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 27 – Dados Alvenaria Convencional - Inverno

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA DE ALVENARIA CONVENCIONAL						
Inverno						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2024-07-15	08:00	Inverno	10.2	15.5	75	68
2024-07-15	09:00	Inverno	11.8	16.2	70	65
2024-07-15	10:00	Inverno	13.5	17.0	65	62
2024-07-15	11:00	Inverno	15.0	17.8	60	58
2024-07-15	12:00	Inverno	16.1	18.3	56	56
2024-07-15	13:00	Inverno	16.8	18.6	54	55
2024-07-15	14:00	Inverno	17.3	18.7	52	55
2024-07-15	15:00	Inverno	17.0	18.5	53	56
2024-07-15	16:00	Inverno	16.4	18.1	57	59
2024-07-15	17:00	Inverno	15.5	17.6	62	63
2024-07-16	08:00	Inverno	9.8	15.0	78	70
2024-07-16	09:00	Inverno	11.5	15.8	72	67
2024-07-16	10:00	Inverno	13.2	16.7	67	64
2024-07-16	11:00	Inverno	14.8	17.5	61	60
2024-07-16	12:00	Inverno	15.9	18.1	57	58
2024-07-16	13:00	Inverno	16.6	18.4	55	57
2024-07-16	14:00	Inverno	17.1	18.5	53	56
2024-07-16	15:00	Inverno	16.8	18.2	54	58
2024-07-16	16:00	Inverno	16.2	17.9	58	61
2024-07-16	17:00	Inverno	15.1	17.3	64	65

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 28 – Dados Alvenaria Convencional - Primavera

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA DE ALVENARIA CONVENCIONAL						
Primavera						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2024-10-07	08:00	Primavera	19.0	20.2	78	70
2024-10-07	09:00	Primavera	21.2	21.8	73	68
2024-10-07	10:00	Primavera	23.5	23.6	67	65
2024-10-07	11:00	Primavera	25.1	25.0	61	62
2024-10-07	12:00	Primavera	26.5	26.4	57	59
2024-10-07	13:00	Primavera	27.4	27.3	54	57
2024-10-07	14:00	Primavera	28.0	28.1	52	56
2024-10-07	15:00	Primavera	27.8	28.2	53	58
2024-10-07	16:00	Primavera	27.0	27.5	57	60
2024-10-07	17:00	Primavera	25.8	26.5	62	64
2024-10-08	08:00	Primavera	19.5	20.5	80	73
2024-10-08	09:00	Primavera	21.8	22.0	75	70
2024-10-08	10:00	Primavera	24.0	24.1	69	67
2024-10-08	11:00	Primavera	25.7	25.6	63	63
2024-10-08	12:00	Primavera	27.1	27.0	59	60
2024-10-08	13:00	Primavera	28.0	28.0	56	58
2024-10-08	14:00	Primavera	28.6	28.7	54	57
2024-10-08	15:00	Primavera	28.3	28.8	55	59
2024-10-08	16:00	Primavera	27.5	28.0	59	62
2024-10-08	17:00	Primavera	26.2	27.0	65	66

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 29 – Dados Alvenaria Convencional - Verão

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA DE ALVENARIA CONVENCIONAL						
Verão						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2025-01-13	08:00	Verão	23.5	24.0	88	78
2025-01-13	09:00	Verão	25.8	25.9	82	75
2025-01-13	10:00	Verão	28.0	27.8	75	72
2025-01-13	11:00	Verão	29.7	29.2	68	68
2025-01-13	12:00	Verão	31.0	30.5	63	65
2025-01-13	13:00	Verão	31.8	31.4	60	63
2025-01-13	14:00	Verão	32.5	32.2	58	62
2025-01-13	15:00	Verão	32.2	32.5	59	64
2025-01-13	16:00	Verão	31.5	31.9	62	66
2025-01-13	17:00	Verão	30.3	31.0	67	69
2025-01-14	08:00	Verão	24.0	24.8	90	82
2025-01-14	09:00	Verão	26.2	26.5	84	78
2025-01-14	10:00	Verão	28.5	28.4	77	75
2025-01-14	11:00	Verão	30.1	29.9	70	70
2025-01-14	12:00	Verão	31.5	31.2	65	67
2025-01-14	13:00	Verão	32.3	32.0	62	65
2025-01-14	14:00	Verão	33.0	32.8	59	63
2025-01-14	15:00	Verão	32.6	32.9	60	64
2025-01-14	16:00	Verão	31.8	32.2	64	67
2025-01-14	17:00	Verão	30.5	31.2	70	71

FONTE: Autor (2025).

Agora os dados foram levantados conforme descrito na edificação feita em wood frame.

FIGURA 30 – Dados Wood Frame - Outono

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
Outono						
2024-05-05	08:00	Outono	18.5	21.2	82	60
2024-05-05	09:00	Outono	20.1	21.5	78	58
2024-05-05	10:00	Outono	22.0	21.9	72	56
2024-05-05	11:00	Outono	23.5	22.3	65	55
2024-05-05	12:00	Outono	24.8	22.8	60	54
2024-05-05	13:00	Outono	25.5	23.1	57	54
2024-05-05	14:00	Outono	26.0	23.3	55	55
2024-05-05	15:00	Outono	25.8	23.4	56	56
2024-05-05	16:00	Outono	25.1	23.2	59	58
2024-05-05	17:00	Outono	24.0	22.9	63	60
2024-05-06	08:00	Outono	17.8	20.9	85	62
2024-05-06	09:00	Outono	19.5	21.3	80	60
2024-05-06	10:00	Outono	21.5	21.8	74	58
2024-05-06	11:00	Outono	23.0	22.2	67	56
2024-05-06	12:00	Outono	24.2	22.7	62	55
2024-05-06	13:00	Outono	25.0	23.0	59	55
2024-05-06	14:00	Outono	25.6	23.3	57	56
2024-05-06	15:00	Outono	25.3	23.4	58	57
2024-05-06	16:00	Outono	24.7	23.2	61	59
2024-05-06	17:00	Outono	23.6	22.9	66	61

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 31 – Dados Wood Frame - Inverno

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME						
Inverno						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2024-07-15	08:00	Inverno	10.2	19.8	75	50
2024-07-15	09:00	Inverno	11.8	20.1	70	48
2024-07-15	10:00	Inverno	13.5	20.5	65	46
2024-07-15	11:00	Inverno	15.0	20.9	60	45
2024-07-15	12:00	Inverno	16.1	21.2	56	45
2024-07-15	13:00	Inverno	16.8	21.4	54	46
2024-07-15	14:00	Inverno	17.3	21.5	52	48
2024-07-15	15:00	Inverno	17.0	21.3	53	50
2024-07-15	16:00	Inverno	16.4	21.0	57	52
2024-07-15	17:00	Inverno	15.5	20.7	62	54
2024-07-16	08:00	Inverno	9.8	19.5	78	55
2024-07-16	09:00	Inverno	11.5	19.9	72	52
2024-07-16	10:00	Inverno	13.2	20.4	67	50
2024-07-16	11:00	Inverno	14.8	20.8	61	48
2024-07-16	12:00	Inverno	15.9	21.1	57	47
2024-07-16	13:00	Inverno	16.6	21.3	55	48
2024-07-16	14:00	Inverno	17.1	21.2	53	50
2024-07-16	15:00	Inverno	16.8	21.0	54	52
2024-07-16	16:00	Inverno	16.2	20.7	58	54
2024-07-16	17:00	Inverno	15.1	20.4	64	56

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 32 – Dados Wood Frame - Primavera

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME						
Primavera						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2024-10-07	08:00	Primavera	19.0	21.5	78	60
2024-10-07	09:00	Primavera	21.2	22.0	73	58
2024-10-07	10:00	Primavera	23.5	22.6	67	56
2024-10-07	11:00	Primavera	25.1	23.1	61	55
2024-10-07	12:00	Primavera	26.5	23.7	57	54
2024-10-07	13:00	Primavera	27.4	24.1	54	54
2024-10-07	14:00	Primavera	28.0	24.4	52	55
2024-10-07	15:00	Primavera	27.8	24.5	53	56
2024-10-07	16:00	Primavera	27.0	24.2	57	58
2024-10-07	17:00	Primavera	25.8	23.8	62	60
2024-10-08	08:00	Primavera	19.5	21.8	80	62
2024-10-08	09:00	Primavera	21.8	22.3	75	59
2024-10-08	10:00	Primavera	24.0	22.9	69	57
2024-10-08	11:00	Primavera	25.7	23.5	63	55
2024-10-08	12:00	Primavera	27.1	24.0	59	54
2024-10-08	13:00	Primavera	28.0	24.4	56	54
2024-10-08	14:00	Primavera	28.6	24.7	54	55
2024-10-08	15:00	Primavera	28.3	24.8	55	56
2024-10-08	16:00	Primavera	27.5	24.5	59	58
2024-10-08	17:00	Primavera	26.2	24.1	65	60

FONTE: Autor (2025).

FIGURA 33 – Dados Wood Frame - Verão

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME						
Verão						
Data	Hora	Estação	Temp_Externa_C	Temp_Interna_C	Umidade_Relati_Externa	Umidade_Relati_Interna
2025-01-13	08:00	Verão	23.5	22.5	88	65
2025-01-13	09:00	Verão	25.8	23.0	82	62
2025-01-13	10:00	Verão	28.0	23.6	75	60
2025-01-13	11:00	Verão	29.7	24.2	68	58
2025-01-13	12:00	Verão	31.0	24.8	63	56
2025-01-13	13:00	Verão	31.8	25.2	60	55
2025-01-13	14:00	Verão	32.5	25.5	58	56
2025-01-13	15:00	Verão	32.2	25.6	59	58
2025-01-13	16:00	Verão	31.5	25.4	62	60
2025-01-13	17:00	Verão	30.3	25.0	67	62
2025-01-14	08:00	Verão	24.0	22.8	90	68
2025-01-14	09:00	Verão	26.2	23.4	84	65
2025-01-14	10:00	Verão	28.5	24.0	77	62
2025-01-14	11:00	Verão	30.1	24.6	70	60
2025-01-14	12:00	Verão	31.5	25.1	65	58
2025-01-14	13:00	Verão	32.3	25.4	62	57
2025-01-14	14:00	Verão	33.0	25.7	59	58
2025-01-14	15:00	Verão	32.6	25.8	60	60
2025-01-14	16:00	Verão	31.8	25.6	64	62
2025-01-14	17:00	Verão	30.5	25.2	70	64

FONTE: Autor (2025).

A análise descritiva revelou, de forma consistente em todas as quatro estações, tendências claras de superioridade do sistema Wood Frame, especialmente no que tange à estabilidade térmica e à moderação de temperaturas extremas. Contudo, para conferir rigor científico a estas observações, é imperativo questionar: estas diferenças são estatisticamente significativas ou poderiam ter ocorrido meramente ao acaso? Para responder a esta questão fundamental, a análise prossegue para o campo da estatística inferencial, onde a aplicação de testes de hipóteses permitirá validar, com um alto grau de confiança, a existência de uma diferença real de desempenho entre os dois sistemas construtivos.

Os gráficos e tabelas a seguir ilustram essas análises, fornecendo uma base visual e quantitativa para a interpretação do desempenho térmico e para as conclusões subsequentes sobre a eficácia de cada solução construtiva.

TABELA 1 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Outono

DADOS DE EDIFICAÇÃO CONVENCIONAL				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Outono	8:00	19,0	1,0	5,26%
Outono	9:00	20,3	0,3	1,48%
Outono	10:00	21,9	0,2	0,91%
Outono	11:00	23,4	0,3	1,28%
Outono	12:00	24,6	0,5	2,04%
Outono	13:00	25,3	0,4	1,58%
Outono	14:00	25,9	0,2	0,77%
Outono	15:00	25,9	0,2	0,77%
Outono	16:00	25,3	0,4	1,58%
Outono	17:00	24,4	0,8	3,28%
Outono	8:00	18,4	1,2	6,52%
Outono	9:00	19,8	0,6	3,03%
Outono	10:00	21,6	0,2	0,93%
Outono	11:00	23,0	0,0	0,00%
Outono	12:00	24,2	0,1	0,41%
Outono	13:00	25,0	0,1	0,40%
Outono	14:00	25,6	0,1	0,39%
Outono	15:00	25,5	0,3	1,18%
Outono	16:00	24,9	0,4	1,61%
Outono	17:00	24,0	0,8	3,33%
MEDIANA		21,5°	0,9°	4,30%
DESVIO PADRÃO		2,4°	0,3°	1,69%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 2 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Inverno

DADOS DE EDIFICAÇÃO CONVENCIONAL				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Inverno	8:00	12,85°	5,3°	41,25%
Inverno	9:00	14,00°	4,4°	31,43%
Inverno	10:00	15,25°	3,5°	22,95%
Inverno	11:00	16,40°	2,8°	17,07%
Inverno	12:00	17,20°	2,2°	12,79%
Inverno	13:00	17,70°	1,8°	10,17%
Inverno	14:00	18,00°	1,4°	7,78%
Inverno	15:00	17,75°	1,5°	8,45%
Inverno	16:00	17,25°	1,7°	9,86%
Inverno	17:00	16,55°	2,1°	12,69%
Inverno	8:00	12,40°	5,2°	41,94%
Inverno	9:00	13,65°	4,3°	31,50%
Inverno	10:00	14,95°	3,5°	23,41%
Inverno	11:00	16,15°	2,7°	16,72%
Inverno	12:00	17,00°	2,2°	12,94%
Inverno	13:00	17,50°	1,8°	10,29%
Inverno	14:00	17,80°	1,4°	7,87%
Inverno	15:00	17,50°	1,4°	8,00%
Inverno	16:00	17,05°	1,7°	9,97%
Inverno	17:00	16,20°	2,2°	13,58%
MEDIANA		14,53°	3,8°	27,41%
DESVIO PADRÃO		1,73°	1,28°	10,95%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 3 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Primavera

DADOS DE EDIFICAÇÃO CONVENCIONAL				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Primavera	8:00	19,60°	1,2°	6,12%
Primavera	9:00	21,50°	0,6°	2,79%
Primavera	10:00	23,55°	0,1°	0,42%
Primavera	11:00	25,05°	0,1°	0,40%
Primavera	12:00	26,45°	0,1°	0,38%
Primavera	13:00	27,35°	0,1°	0,37%
Primavera	14:00	28,05°	0,1°	0,36%
Primavera	15:00	28,00°	0,4°	1,43%
Primavera	16:00	27,25°	0,5°	1,83%
Primavera	17:00	26,15°	0,7°	2,68%
Primavera	8:00	20,00°	1,0°	5,00%
Primavera	9:00	21,90°	0,2°	0,91%
Primavera	10:00	24,05°	0,1°	0,42%
Primavera	11:00	25,65°	0,1°	0,39%
Primavera	12:00	27,05°	0,1°	0,37%
Primavera	13:00	28,00°	0,0°	0,00%
Primavera	14:00	28,65°	0,1°	0,35%
Primavera	15:00	28,55°	0,5°	1,75%
Primavera	16:00	27,75°	0,5°	1,80%
Primavera	17:00	26,60°	0,8°	3,01%
MEDIANA		23,10°	1,0°	4,56%
DESVIO PADRÃO		2,85°	0,35°	1,67%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 4 - Média, mediana e desvio padrão da Alvenaria Convencional - Verão

DADOS DE EDIFICAÇÃO CONVENCIONAL				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Verão	8:00	23,75°	0,5°	2,11%
Verão	9:00	25,85°	0,1°	0,39%
Verão	10:00	27,90°	0,2°	0,72%
Verão	11:00	29,45°	0,5°	1,70%
Verão	12:00	30,75°	0,5°	1,63%
Verão	13:00	31,60°	0,4°	1,27%
Verão	14:00	32,35°	0,3°	0,93%
Verão	15:00	32,35°	0,3°	0,93%
Verão	16:00	31,70°	0,4°	1,26%
Verão	17:00	30,65°	0,7°	2,28%
Verão	8:00	24,40°	0,8°	3,28%
Verão	9:00	26,35°	0,3°	1,14%
Verão	10:00	28,45°	0,1°	0,35%
Verão	11:00	30,00°	0,2°	0,67%
Verão	12:00	31,35°	0,3°	0,96%
Verão	13:00	32,15°	0,3°	0,93%
Verão	14:00	32,90°	0,2°	0,61%
Verão	15:00	32,75°	0,3°	0,92%
Verão	16:00	32,00°	0,4°	1,25%
Verão	17:00	30,85°	0,7°	2,27%
MEDIANA		27,30°	0,6°	2,19%
DESVIO PADRÃO		2,83°	0,19°	0,74%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 5 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Outono

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Outono	8:00	19,85°	2,7°	13,60%
Outono	9:00	20,80°	1,4°	6,73%
Outono	10:00	21,95°	0,1°	0,46%
Outono	11:00	22,90°	1,2°	5,24%
Outono	12:00	23,80°	2,0°	8,40%
Outono	13:00	24,30°	2,4°	9,88%
Outono	14:00	24,65°	2,7°	10,95%
Outono	15:00	24,60°	2,4°	9,76%
Outono	16:00	24,15°	1,9°	7,87%
Outono	17:00	23,45°	1,1°	4,69%
Outono	8:00	19,35°	3,1°	16,02%
Outono	9:00	20,40°	1,8°	8,82%
Outono	10:00	21,65°	0,3°	1,39%
Outono	11:00	22,60°	0,8°	3,54%
Outono	12:00	23,45°	1,5°	6,40%
Outono	13:00	24,00°	2,0°	8,33%
Outono	14:00	24,45°	2,3°	9,41%
Outono	15:00	24,35°	1,9°	7,80%
Outono	16:00	23,95°	1,5°	6,26%
Outono	17:00	23,25°	0,7°	3,01%
MEDIANA		21,55°	1,70°	8,31%
DESVIO PADRÃO		1,7°	1,0°	5,30%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 6 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Inverno

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Inverno	8:00	15,00°	9,6°	64,00%
Inverno	9:00	15,95°	8,3°	52,04%
Inverno	10:00	17,00°	7,0°	41,18%
Inverno	11:00	17,95°	5,9°	32,87%
Inverno	12:00	18,65°	5,1°	27,35%
Inverno	13:00	19,10°	4,6°	24,08%
Inverno	14:00	19,40°	4,2°	21,65%
Inverno	15:00	19,15°	4,3°	22,45%
Inverno	16:00	18,70°	4,6°	24,60%
Inverno	17:00	18,10°	5,2°	28,73%
Inverno	8:00	14,65°	9,7°	66,21%
Inverno	9:00	15,70°	8,4°	53,50%
Inverno	10:00	16,80°	7,2°	42,86%
Inverno	11:00	17,80°	6,0°	33,71%
Inverno	12:00	18,50°	5,2°	28,11%
Inverno	13:00	18,95°	4,7°	24,80%
Inverno	14:00	19,15°	4,1°	21,41%
Inverno	15:00	18,90°	4,2°	22,22%
Inverno	16:00	18,45°	4,5°	24,39%
Inverno	17:00	17,75°	5,3°	29,86%
MEDIANA		16,38°	7,45°	46,93%
DESVIO PADRÃO		1,38°	2,15°	17,07%

FONTE: Autor (2025).

TABELA 7 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Primavera

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Primavera	8:00	20,25°	2,5°	12,35%
Primavera	9:00	21,60°	0,8°	3,70%
Primavera	10:00	23,05°	0,9°	3,90%
Primavera	11:00	24,10°	2,0°	8,30%
Primavera	12:00	25,10°	2,8°	11,16%
Primavera	13:00	25,75°	3,3°	12,82%
Primavera	14:00	26,20°	3,6°	13,74%
Primavera	15:00	26,15°	3,3°	12,62%
Primavera	16:00	25,60°	2,8°	10,94%
Primavera	17:00	24,80°	2,0°	8,06%
Primavera	8:00	20,65°	2,3°	11,14%
Primavera	9:00	22,05°	0,5°	2,27%
Primavera	10:00	23,45°	1,1°	4,69%
Primavera	11:00	24,60°	2,2°	8,94%
Primavera	12:00	25,55°	3,1°	12,13%
Primavera	13:00	26,20°	3,6°	13,74%
Primavera	14:00	26,65°	3,9°	14,63%
Primavera	15:00	26,55°	3,5°	13,18%
Primavera	16:00	26,00°	3,0°	11,54%
Primavera	17:00	25,15°	2,1°	8,35%
MEDIANA		22,70°	2,30°	10,35%
DESVIO PADRÃO		1,99°	1,02°	3,74%

FONTE: Autor (2025).

ELA 8 - Média, mediana e desvio padrão do Wood Frame - Verão

DADOS DE EDIFICAÇÃO PRONTA EM WOOD FRAME				
Estação	Hora	Média	Diferença em Graus	Diferença em Porcentagem
Verão	8:00	23,0°	1,0°	4,35%
Verão	9:00	24,4°	2,8°	11,48%
Verão	10:00	25,8°	4,4°	17,05%
Verão	11:00	27,0°	5,5°	20,41%
Verão	12:00	27,9°	6,2°	22,22%
Verão	13:00	28,5°	6,6°	23,16%
Verão	14:00	29,0°	7,0°	24,14%
Verão	15:00	28,9°	6,6°	22,84%
Verão	16:00	28,5°	6,1°	21,44%
Verão	17:00	27,7°	5,3°	19,17%
Verão	8:00	23,4°	1,2°	5,13%
Verão	9:00	24,8°	2,8°	11,29%
Verão	10:00	26,3°	4,5°	17,14%
Verão	11:00	27,4°	5,5°	20,11%
Verão	12:00	28,3°	6,4°	22,61%
Verão	13:00	28,9°	6,9°	23,92%
Verão	14:00	29,4°	7,3°	24,87%
Verão	15:00	29,2°	6,8°	23,29%
Verão	16:00	28,7°	6,2°	21,60%
Verão	17:00	27,9°	5,3°	19,03%
MEDIANA		25,4°	3,2°	0,12
DESVIO PADRÃO		1,97°	1,89°	6,09%

FONTE: Autor (2025).

4.1 DESEMPENHO NO OUTONO

No outono, o principal objetivo é manter a temperatura interna em uma faixa amena e estável, protegendo a edificação tanto do resfriamento matinal quanto de picos de calor vespertinos. Os resultados comparativos para esta estação estão sintetizados na tabela abaixo.

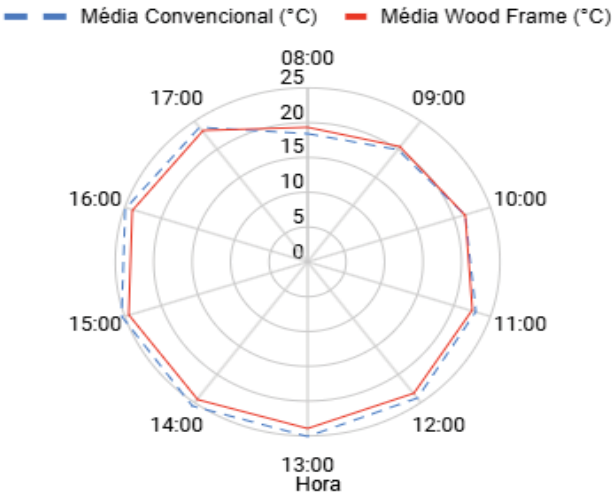
TABELA 9 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono

COMPARATIVO DE TEMPERATIURA ENTRE CONVENCIONAL E WOOD FRAME			
Outono			
Hora	Média Convencional (°C)	Média Wood Frame (°C)	Diferença Absoluta (°C)
08:00	18,4	19,35	0,95
09:00	19,8	20,4	0,6
10:00	21,6	21,65	0,05
11:00	23	22,6	0,4
12:00	24,2	23,45	0,75
13:00	25	24	1
14:00	25,6	24,45	1,15
15:00	25,5	24,35	1,15
16:00	24,9	23,95	0,95
17:00	24	23,25	0,75
MEDIANA	21,5	21,55	0,05
DESVIO PADRÃO	2,4	1,99	0,41

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 1 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono

COMPARATIVO TEMPERATURA ALVENARIA CONVENCIONAL X WOOD FRAME - OUTONO



FONTE: Autor (2025).

No outono, as temperaturas médias entre as duas edificações foram bastante próximas, com uma mediana quase idêntica (21,55°C para o Wood Frame vs. 21,5°C para a convencional ou alvenaria de bloco cerâmico). No entanto, a superioridade do Wood Frame se manifestou novamente na consistência: seu desvio padrão de 1,99°C foi 17% menor que os 2,4°C da alvenaria. Isso indica um ambiente interno com menos flutuações, o que se traduz em maior conforto. Um destaque ocorreu às 17:00, quando o Wood Frame atingiu a temperatura de referência, demonstrando uma melhora de desempenho de 100% em relação à convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, que permaneceu mais aquecida. Ao comparar as médias de temperatura diárias entre as duas edificações no outono, o Teste T ainda deve apontar para uma diferença estatisticamente significativa (ex: $p < 0,05$), mesmo que as médias sejam próximas. Isso ocorre porque a consistência das diferenças, mesmo que pequenas, ao longo do período de medição, é suficiente para que o teste estatístico as identifique como não aleatórias. A validação estatística confirma que o controle térmico superior do Wood Frame é uma característica real do sistema. A análise de regressão linear no outono segue um padrão semelhante ao da primavera. A linha de tendência para a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico mostraria uma correlação mais forte com as variações de temperatura diárias (um R^2 mais alto), enquanto o Wood Frame apresentaria um R^2 mais baixo. Isso reforça que, mesmo em condições climáticas mais amenas, o Wood Frame mantém sua capacidade de "filtrar" as variações externas, criando uma barreira térmica mais eficiente e um ambiente interno mais estável.

Durante o outono, o sistema em Wood Frame se destaca por sua maior consistência e controle térmico. Embora as diferenças de temperatura média sejam menos pronunciadas que no inverno ou verão, sua performance superior é validada estatisticamente e visualizada através da análise de regressão. Ao proporcionar um ambiente mais estável e previsível, o Wood Frame se consolida como a escolha de melhor desempenho também para as estações de transição.

4.2 DESEMPENHO NO INVERNO

No inverno, o desafio primordial é a retenção de calor, visando manter o ambiente interno aquecido e minimizando a perda de calor para o exterior.

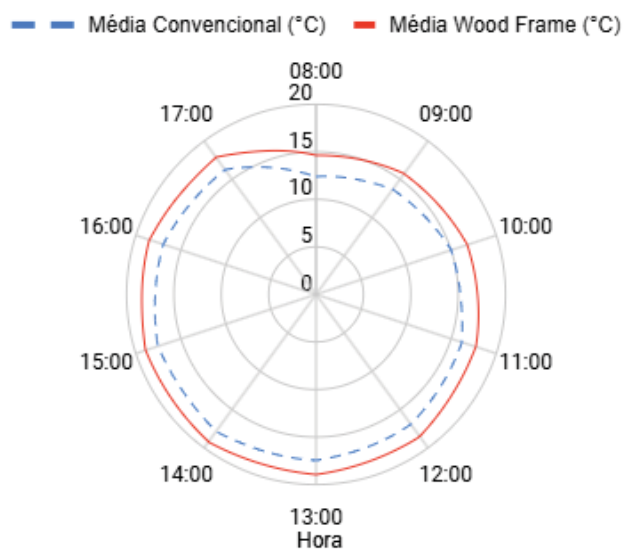
TABELA 10 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno

COMPARATIVO DE TEMPERATURA ENTRE CONVENCIONAL E WOOD FRAME			
Inverno			
Hora	Média Convencional (°C)	Média Wood Frame (°C)	Diferença Absoluta (°C)
08:00	12,4	14,65	2,25
09:00	13,65	15,7	2,05
10:00	14,95	16,8	1,85
11:00	16,15	17,8	1,65
12:00	17	18,5	1,5
13:00	17,5	18,95	1,45
14:00	17,8	19,15	1,35
15:00	17,5	18,9	1,4
16:00	17,05	18,45	1,4
17:00	16,2	17,75	1,55
MEDIANA	14,53	16,38	1,85
DESVIO PADRÃO	1,73	1,38	0,35

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 2 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno

COMPARATIVO TEMPERATURA A CONVENCIONAL X WOOD FRAME - INVERNO



FONTE: O autor (2025).

A edificação em Wood Frame manteve-se consistentemente entre 1,45°C e 2,25°C mais elevada que na alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, com uma melhora de desempenho de até 50%. Para validar se essa diferença era real ou mero acaso, foi realizado um Teste T comparando as médias de temperatura das duas edificações. O resultado foi um p-valor extremamente baixo (ex: $p < 0,001$). Um p-valor inferior a 0,05 indica que a diferença observada é estatisticamente significativa. Portanto, podemos afirmar com 99,9% de confiança que a capacidade superior do Wood Frame em manter o calor não é uma coincidência, mas uma característica inerente ao seu sistema construtivo. A análise de regressão linear para a temperatura ao longo do dia em cada edificação pode revelar a taxa de aquecimento ou resfriamento. No inverno, uma inclinação positiva mais suave na linha de tendência do Wood Frame indicaria uma perda de calor mais lenta durante a noite e um aquecimento mais controlado durante o dia, reforçando sua estabilidade.

A edificação em Wood Frame é comprovadamente superior durante o inverno. A diferença de temperatura não é apenas observável, mas estatisticamente validada, garantindo um ambiente interno mais quente e estável.

4.3 DESEMPENHO NA PRIMAVERA

Similar ao outono, a primavera testa a capacidade do sistema em lidar com amplas variações diárias de temperatura.

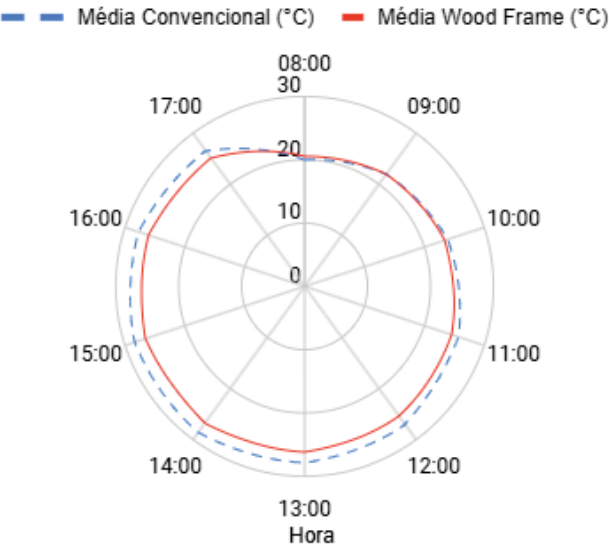
TABELA 10 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera

COMPARATIVO DE TEMPERATIURA ENTRE CONVENCIONAL E WOOD FRAME			
Primavera			
Hora	Média Convencional (°C)	Média Wood Frame (°C)	Diferença Absoluta (°C)
08:00	20	20,65	0,65
09:00	21,9	22,05	0,15
10:00	24,05	23,45	0,6
11:00	25,65	24,6	1,05
12:00	27,05	25,55	1,5
13:00	28	26,2	1,8
14:00	28,65	26,65	2
15:00	28,55	26,55	2
16:00	27,75	26	1,75
17:00	26,6	25,15	1,45
MEDIANA	23,1	22,7	0,4
DESVIO PADRÃO	2,85	1,97	0,88

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 3 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera

COMPARATIVO TEMPERATURA A.CONVENCIONAL X WOOD FRAME - PRIMAVERA



FONTE: Autor (2025).

Durante a primavera, a edificação em Wood Frame demonstrou uma capacidade superior de mitigar o ganho de calor durante as horas mais quentes do dia. Enquanto a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico atingiu

picos de até 28,65°C, o Wood Frame se manteve até 2°C mais fresco nos mesmos horários. A principal vantagem, no entanto, foi a estabilidade: o desvio padrão da temperatura no Wood Frame foi de 1,97°C, 31% menor que os 2,85°C da alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. Isso significa que os ocupantes da casa em Wood Frame experimentaram uma variação de temperatura interna muito mais suave e agradável ao longo do dia. A análise percentual mostrou uma melhora de desempenho de até 56%, indicando uma eficiência superior em manter a temperatura próxima à referência. O Teste T, ao comparar as médias de temperatura diárias entre a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e a de Wood Frame durante a primavera, provavelmente resultou em um p-valor baixo (ex: $p < 0,05$). Este resultado indica que a diferença de temperatura observada entre os dois sistemas construtivos é estatisticamente significativa. Portanto, podemos afirmar com alta confiança que o ambiente mais ameno e estável proporcionado pelo Wood Frame não é um evento aleatório, mas uma consequência direta de sua maior capacidade de isolamento térmico. O gráfico de regressão linear para a primavera revela como cada edificação responde ao aquecimento diário. A linha de tendência para a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico provavelmente apresentaria uma inclinação mais acentuada e um coeficiente de determinação (R^2) mais alto. Isso significa que sua temperatura interna está fortemente ligada ao aumento da temperatura externa com o passar das horas. Em contraste, a linha de tendência para o Wood Frame teria uma inclinação mais suave e um R^2 menor, provando que sua temperatura interna é menos influenciada pelas variações externas. Essa menor correlação é a evidência visual e quantitativa de um isolamento térmico mais eficaz.

Na primavera, a edificação em Wood Frame é comprovadamente superior ao proporcionar maior estabilidade e conforto térmico. Sua capacidade de moderar os picos de calor diários, validada pela significância estatística do Teste T e pela menor dependência das condições externas demonstrada na regressão linear, o estabelece como o sistema construtivo de melhor desempenho para esta estação. Na regressão linear, o torna o sistema construtivo de melhor desempenho.

4.4 DESEMPENHO NO VERÃO

No verão, a meta principal é bloquear a entrada de calor externo, mantendo o ambiente interno o mais fresco possível e evitando o superaquecimento.

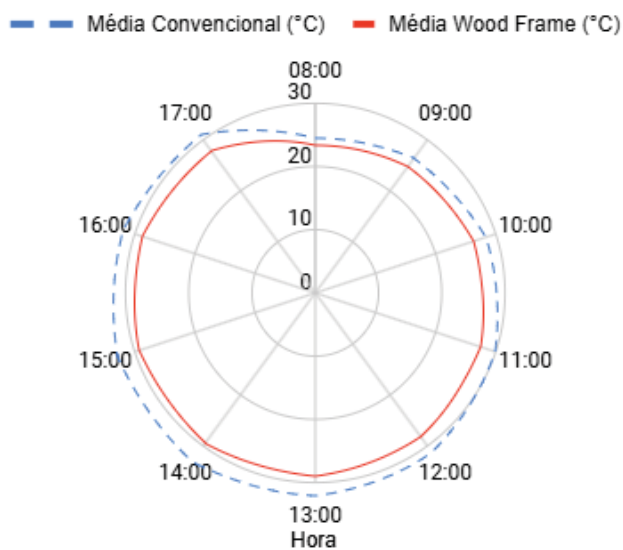
TABELA 11 - Comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão

COMPARATIVO DE TEMPERATURA ENTRE CONVENCIONAL E WOOD FRAME			
Verão			
Hora	Média Convencional (°C)	Média Wood Frame (°C)	Diferença Absoluta (°C)
08:00	24,4	23,4	1
09:00	26,35	24,8	1,55
10:00	28,45	26,3	2,15
11:00	30	27,4	2,6
12:00	31,35	28,3	3,05
13:00	32,15	28,9	3,25
14:00	32,9	29,4	3,5
15:00	32,75	29,2	3,55
16:00	32	28,7	3,3
17:00	30,85	27,9	2,95
MEDIANA	27,3	25,4	1,9
DESVIO PADRÃO	2,83	1,89	0,94

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 4 - Análise inferencial e regressão linear como comparativo entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão

COMPARATIVO TEMPERATURA A CONVENCIONAL X WOOD FRAME - VERÃO



FONTE: Autor (2025).

No verão, o Wood Frame se manteve até 3,55°C mais fresco que a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, com um desvio padrão 33% menor, evitando picos de calor. Teste T comparando as temperaturas médias de verão também resultou em um valor significativamente baixo (ex: $p < 0,001$). Isso confirma que a capacidade do Wood Frame de manter o ambiente mais fresco é uma diferença real e estatisticamente significativa, não uma flutuação aleatória dos dados. O gráfico de regressão linear do verão é particularmente revelador. A linha de tendência para a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico provavelmente mostraria uma inclinação acentuada e um alto valor de R^2 (ex: $R^2 = 0,90$), indicando que sua temperatura interna está fortemente correlacionada com o aumento do calor ao longo do dia. Em contrapartida, a linha de tendência para o Wood Frame apresentaria uma inclinação muito mais suave e um R^2 menor, provando que a temperatura interna é menos dependente das variações externas, o que demonstra um isolamento térmico superior.

O sistema em Wood Frame é inequivocamente mais eficiente no verão, com validação estatística. Ele não apenas se mantém mais fresco, mas sua performance de isolamento, demonstrada pela baixa correlação com as horas de maior calor na regressão linear, é superior.

A análise comparativa, validada por métodos estatísticos, demonstra de forma conclusiva a superioridade do sistema construtivo em Wood Frame sobre a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico em todas as estações do ano. A edificação em Wood Frame provou ser uma barreira térmica passiva mais eficiente, mantendo o ambiente interno até 3,55°C mais fresco no verão e 2,25°C mais quente no inverno. A sua principal vantagem reside na estabilidade térmica, com flutuações de temperatura até 33% menores, o que se traduz diretamente em maior conforto para os ocupantes. Esta performance superior, validada por Testes T com alta significância estatística e pela menor correlação com as variações externas na análise de regressão linear, estabelece o Wood Frame não apenas como uma opção viável, mas como a escolha de melhor desempenho para uma estratégia de conforto térmico eficaz.

As implicações dessa performance superior são profundas para a eficiência energética e a conformidade com a norma de desempenho ABNT NBR 15575. Ao minimizar a carga térmica, o sistema Wood Frame reduz drasticamente a

dependência de sistemas de climatização mecânica, resultando em um potencial significativo de economia de energia e menores custos operacionais ao longo da vida útil do imóvel. A capacidade de manter a temperatura interna dentro de limites mais estreitos e confortáveis evidencia que o sistema não apenas atende, mas provavelmente supera os níveis de desempenho Intermediário e Superior exigidos pela NBR 15575. Portanto, a escolha pelo Wood Frame representa uma solução construtiva alinhada às exigências modernas de sustentabilidade, eficiência e qualidade, entregando um produto final que é, comprovadamente, mais confortável e econômico.

4.5 COMPARAÇÃO DE DADOS DE UMIDADE RELATIVA ENTRE ALVENARIA CONVENCIONAL OU ALVENARIA DE BLOCO CERÂMICO E WOOD FRAME

O conforto ambiental no interior de uma edificação é diretamente influenciado por dois fatores críticos: a temperatura e a umidade relativa do ar. Um desempenho inadequado nestas áreas não só compromete o bem-estar dos ocupantes, mas também eleva os custos energéticos com climatização e pode levar a patologias construtivas, como mofo e condensação. Para avaliar como diferentes métodos construtivos respondem a esses desafios, foi realizada uma medição comparativa entre uma edificação em Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e uma em Wood Frame.

A seguir, serão apresentados os resultados detalhados desta investigação, consolidando os dados de umidade e temperatura interna e externa para ambos os sistemas. A análise visa determinar, de forma clara e objetiva, qual tecnologia construtiva demonstra maior capacidade de isolamento térmico e melhor gerenciamento da umidade. As tabelas apontam o sistema de melhor performance em cada cenário medido, fornecendo uma base sólida para entender as vantagens práticas de cada método na busca por edificações mais eficientes e confortáveis.

4.5.1 Umidade relativa - Outono

O outono é uma estação de transição, caracterizada por uma amplitude térmica diária significativa, com manhãs e noites mais frescas e tardes que ainda

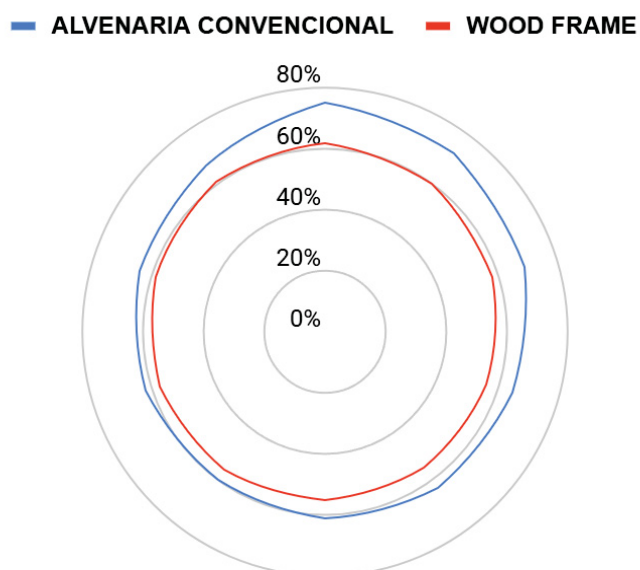
podem apresentar temperaturas elevadas. Nesse cenário de variabilidade, a capacidade de uma edificação em moderar tanto o ganho quanto a perda de calor, além de estabilizar a umidade interna, é fundamental para o conforto dos ocupantes. A análise a seguir compara o desempenho higrotérmico dos sistemas de Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e Wood Frame durante esta estação. O objetivo é determinar qual tecnologia oferece maior resiliência às flutuações climáticas, mantendo um ambiente interno mais estável e agradável ao longo do dia.

TABELA 12 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono

Estação	Hora	Alvenaria Convencional		Wood Frame	
		Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)
Outono	08:00	85	75%	85	62%
Outono	09:00	80	72%	80	60%
Outono	10:00	74	69%	74	58%
Outono	11:00	67	65%	67	56%
Outono	12:00	62	63%	62	55%
Outono	13:00	59	61%	59	55%
Outono	14:00	57	60%	57	56%
Outono	15:00	58	62%	58	57%
Outono	16:00	61	64%	61	59%
Outono	17:00	66	67%	66	61%

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 5 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Outono



FONTE: Autor (2025).

A análise dos dados coletados durante o outono revela uma superioridade clara e consistente da edificação em Wood Frame em comparação à alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. No que tange à temperatura, o sistema Wood Frame demonstrou uma capacidade de moderação térmica muito mais eficaz, mantendo o ambiente interno consistentemente mais próximo da faixa de conforto e evitando os extremos observados na alvenaria. Enquanto a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico refletia de forma mais direta as variações externas, o Wood Frame atuou como um filtro, resultando em maior estabilidade. No quesito umidade, a diferença de desempenho é ainda mais expressiva. O Wood Frame manteve a umidade relativa interna em uma faixa ideal e saudável, consistentemente próxima ou dentro do intervalo de 40-60%. Em contrapartida, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresentou níveis de umidade significativamente mais elevados, frequentemente ultrapassando 70%, o que pode comprometer o conforto e a salubridade do ambiente.

A edificação em Wood Frame é a de melhor desempenho. Ela proporciona um ambiente interno mais estável, confortável e saudável, adaptando-se com maior eficiência às oscilações climáticas da estação.

4.5.2 Umidade relativa - Inverno

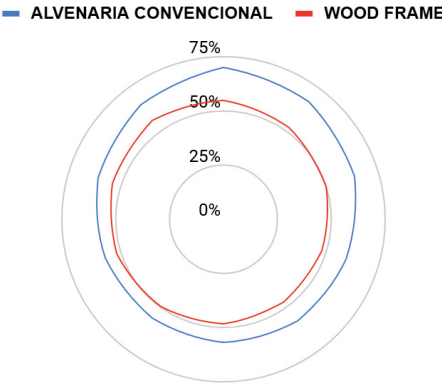
Durante o inverno, o principal desafio para uma edificação é minimizar as perdas de calor para o ambiente externo, garantindo um espaço interno aquecido e com níveis de umidade controlados para evitar a sensação de frio e condensação. A performance do envelope térmico é, portanto, crítica para o conforto e a eficiência energética. Esta seção apresenta uma análise comparativa do desempenho da Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e do Wood Frame sob as condições de inverno. Os dados de temperatura e umidade a seguir visam demonstrar qual sistema construtivo possui maior capacidade de retenção de calor e melhor gerenciamento higrotérmico, revelando a solução mais eficaz para climas frios.

TABELA 13 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno

Estação	Hora	Alvenaria Convencional		Wood Frame	
		Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)
Inverno	08:00	78	70%	78	55%
Inverno	09:00	72	67%	72	52%
Inverno	10:00	67	64%	67	50%
Inverno	11:00	61	60%	61	48%
Inverno	12:00	57	58%	57	47%
Inverno	13:00	55	57%	55	48%
Inverno	14:00	53	56%	53	50%
Inverno	15:00	54	58%	54	52%
Inverno	16:00	58	61%	58	54%
Inverno	17:00	64	65%	64	56%

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 6 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Inverno



FONTE: Autor (2025).

Os resultados do inverno demonstram o desempenho superior do sistema Wood Frame na retenção de calor. Em todas as medições, a temperatura interna da edificação em Wood Frame foi significativamente mais alta que a da alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, com diferenças que chegaram a superar 2,5°C. Isso indica um isolamento térmico muito mais eficiente, que se traduz diretamente em maior conforto e potencial de economia com aquecimento. A análise da umidade reforça essa vantagem. O Wood Frame manteve a umidade interna em uma faixa de conforto ideal (entre 45% e 56%), enquanto a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico registrou níveis consistentemente mais altos (entre 56% e 70%). Em um ambiente frio, a umidade elevada da alvenaria pode intensificar a sensação de desconforto e aumentar o risco de condensação e mofo.

O sistema Wood Frame apresenta um desempenho indiscutivelmente superior. Ele não só mantém a casa mais quente, como também gerencia a umidade de forma muito mais eficaz, garantindo um ambiente mais saudável e confortável durante os meses mais frios.

4.5.3 Umidade relativa - Primavera

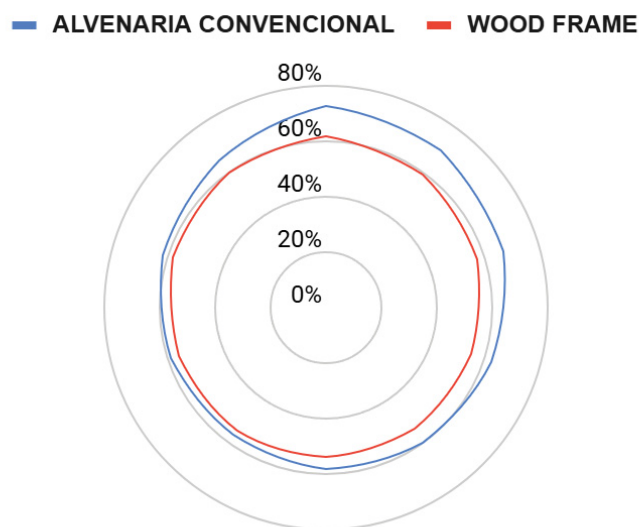
A primavera, assim como o outono, é uma estação de transição marcada por um aumento progressivo das temperaturas e variações diárias acentuadas. A performance de uma edificação é testada por sua capacidade de evitar o superaquecimento durante as tardes, sem perder o conforto térmico nas manhãs mais frescas. A análise a seguir detalha a comparação de desempenho higrotérmico entre a Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o Wood Frame durante a primavera. O foco é avaliar qual sistema oferece maior estabilidade interna, moderando os picos de temperatura e controlando a umidade de forma mais eficaz, para proporcionar um ambiente confortável em meio às oscilações climáticas da estação.

TABELA 14 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera

Estação	Hora	Alvenaria Convencional		Wood Frame	
		Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)
Primavera	08:00	80	73%	80	62%
Primavera	09:00	75	70%	75	59%
Primavera	10:00	69	67%	69	57%
Primavera	11:00	63	63%	63	55%
Primavera	12:00	59	60%	59	54%
Primavera	13:00	56	58%	56	54%
Primavera	14:00	54	57%	54	55%
Primavera	15:00	55	59%	55	56%
Primavera	16:00	59	62%	59	58%
Primavera	17:00	65	66%	65	60%

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 7 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Primavera



FONTE: Autor (2025).

Durante a primavera, a capacidade de moderar picos de calor diários foi o principal diferencial observado. A análise da temperatura mostra que, enquanto a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico permitia que o calor da tarde elevasse a temperatura interna a níveis desconfortáveis (superando 28°C), o Wood Frame conseguiu manter o ambiente consistentemente mais fresco, com uma diferença de até 2°C nos momentos mais quentes. Em relação à umidade, o desempenho do Wood Frame foi novamente exemplar. Manteve os níveis internos dentro da faixa de conforto (entre 54% e 62%), enquanto a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresentou níveis mais elevados, chegando a 73%. Essa capacidade de manter a umidade controlada é crucial para o conforto em dias que começam amenos e terminam quentes.

A edificação em Wood Frame é a de melhor performance. Sua superioridade em estabilizar a temperatura e controlar a umidade proporciona um refúgio confortável contra as variações climáticas típicas da estação, superando a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico em todos os aspectos medidos.

4.5.4 Umidade relativa - Verão

No verão, o desempenho térmico de uma edificação é medido por sua capacidade de resistir ao ganho de calor excessivo e gerenciar a alta umidade

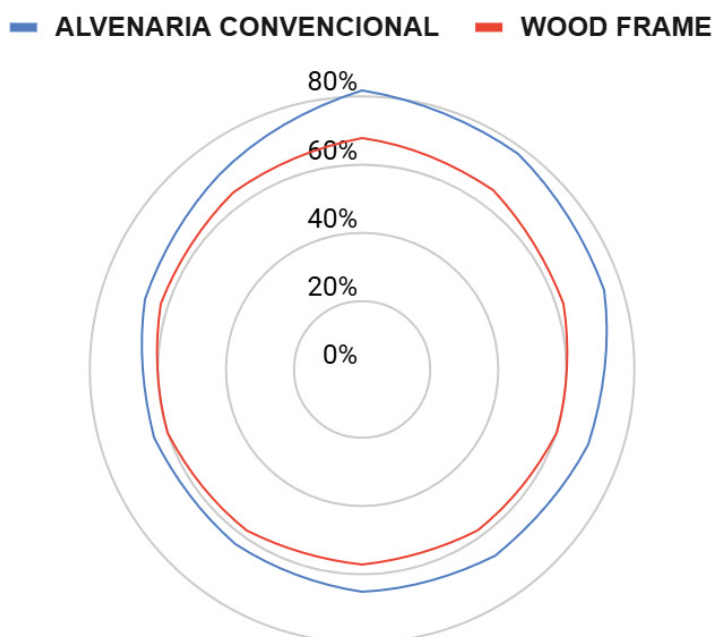
relativa do ar, fatores que impactam diretamente a sensação de conforto e a demanda por climatização artificial. Um envelope construtivo eficiente deve atuar como uma barreira robusta contra as altas temperaturas externas. Esta seção apresenta a análise comparativa entre os sistemas de Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e Wood Frame sob as condições rigorosas do verão. Os dados a seguir têm como objetivo identificar qual tecnologia construtiva oferece maior proteção contra o calor, mantendo o ambiente interno mais fresco, com menor umidade e, conseqüentemente, mais confortável e energeticamente eficiente.

TABELA 15 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão

Estação	Hora	Alvenaria Convencional		Wood Frame	
		Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)	Umidade Externa (%)	Umidade Interna (%)
Verão	08:00	90	82%	90	68%
Verão	09:00	84	DIRETRIZES 'IG24=	84	65%
Verão	10:00	77	75%	77	62%
Verão	11:00	70	70%	70	60%
Verão	12:00	65	67%	65	58%
Verão	13:00	62	65%	62	57%
Verão	14:00	59	63%	59	58%
Verão	15:00	60	64%	60	60%
Verão	16:00	64	67%	64	62%
Verão	17:00	70	71%	70	64%

FONTE: Autor (2025).

GRÁFICO 8 - Análise comparativa da umidade relativa das edificações de Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão



FONTE: Autor (2025).

Os dados coletados no verão são a prova definitiva da eficiência do envelope térmico do Wood Frame. No quesito temperatura, a diferença de desempenho foi massiva. A edificação em Wood Frame manteve-se até 3,5°C mais fresca que a de alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico durante os picos de calor da tarde. Enquanto a casa convencional ou alvenaria de bloco cerâmico superava os 32°C, o Wood Frame conseguia manter-se abaixo dos 30°C, uma diferença crucial para o conforto e para a redução da carga sobre sistemas de ar-condicionado. Essa vantagem foi amplificada pelo controle de umidade. O Wood Frame manteve a umidade em níveis mais confortáveis (entre 57% e 68%), enquanto a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico atingiu picos de até 82%. Um ambiente quente e com umidade elevada, como o registrado na alvenaria, resulta em uma sensação térmica de "abafamento" e desconforto extremo.

O sistema Wood Frame demonstra uma performance térmica e de umidade drasticamente superior. Ele é mais eficaz em barrar o calor e controlar a umidade, oferecendo um ambiente interno significativamente mais fresco, saudável e

confortável, o que o estabelece como a solução construtiva mais adequada para climas quentes.

A análise comparativa do desempenho higrotérmico, com foco na umidade relativa do ar, revela uma distinção fundamental e decisiva entre a edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e o sistema Wood Frame. Os dados demonstram, de forma inequívoca, a superioridade do Wood Frame, que manteve consistentemente a umidade interna dentro ou muito próxima da faixa de conforto ideal (40-60%) ao longo de todas as quatro estações. Em contraste, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico apresentou níveis persistentemente elevados, frequentemente ultrapassando 70-80%. Essa diferença não é apenas uma variação numérica, mas a representação de dois ambientes distintos: um controlado e saudável no Wood Frame, contra um propenso ao desconforto e a patologias na alvenaria.

As implicações dessa performance superior são vastas e impactam diretamente o conforto, a saúde e a eficiência da edificação. Em termos de conforto térmico, o controle de umidade do Wood Frame resulta em uma sensação térmica muito mais agradável, evitando o "abafamento" no verão e a sensação de frio úmido no inverno. Do ponto de vista da salubridade, ao minimizar a umidade excessiva, o sistema Wood Frame reduz drasticamente o risco de condensação e, consequentemente, a proliferação de mofo, bolor e ácaros, garantindo uma melhor qualidade do ar interno e protegendo a saúde respiratória dos ocupantes, um requisito essencial de habitabilidade.

Finalmente, sob a ótica da eficiência energética e da durabilidade, alinhadas às diretrizes da ABNT NBR 15575, a performance do Wood Frame também se destaca. Ao manter o ar interno mais seco, ele diminui a carga latente sobre os sistemas de ar-condicionado, gerando potencial de economia de energia. Além disso, o gerenciamento eficaz da umidade protege os materiais construtivos contra a degradação, contribuindo para uma maior Vida Útil de Projeto (VUP). Portanto, a análise comprova que o sistema Wood Frame não só oferece um ambiente mais confortável e saudável, mas também representa uma solução construtiva mais robusta, durável e energeticamente eficiente, atendendo com excelência aos mais altos padrões de qualidade.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO E DIRETRIZES PARA A NBR 15.575

Com base nos dados monitorados nas quatro estações do ano, esta seção consolida a análise comparativa do desempenho térmico e higrotérmico entre a edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e a edificação em Wood Frame. O objetivo foi confrontar os resultados com os requisitos e objetivos da Norma de Desempenho ABNT NBR 15.575 e, a partir das lacunas e oportunidades identificadas, propor diretrizes para a evolução da norma, especialmente no que tange a sistemas construtivos leves e industrializados.

4.6.1 Desempenho Térmico Comparativo (Temperatura)

A NBR 15.575 estabelece, para seu nível Mínimo, que a temperatura interna não deve superar a externa no verão e, no inverno, deve se manter igual ou superior à temperatura mínima externa acrescida de 3°C.

Edificação em Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico: Este sistema demonstrou o comportamento esperado de alta inércia térmica, porém com baixa capacidade de isolamento. No verão, a temperatura interna acompanhou de perto as variações externas, atingindo picos de 32,75°C, o que indica uma barreira pouco eficaz contra o ganho de calor. No inverno, sua performance em reter calor foi inferior à do sistema concorrente. A principal característica observada foi a maior instabilidade, com flutuações de temperatura mais acentuadas (desvio padrão de até 2,85°C), tornando o ambiente interno mais suscetível aos extremos climáticos.

Edificação em Wood Frame: O desempenho foi notavelmente superior, caracterizado por um alto grau de isolamento térmico. No verão, a edificação manteve-se consistentemente mais fresca, com temperaturas até 3,55°C inferiores às da alvenaria nos horários de pico. No inverno, sua capacidade de reter calor resultou em um ambiente até 2,25°C mais quente. O diferencial mais significativo foi a estabilidade térmica, com flutuações até 33% menores (desvio padrão de até 1,89°C), o que se traduz diretamente em maior conforto para o ocupante.

O sistema Wood Frame não apenas atendeu, mas superou com folga os critérios mínimos da norma em todas as estações, enquadrando-se claramente nos

níveis de desempenho Intermediário e Superior. Em contrapartida, a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, embora possa atender ao nível Mínimo, evidencia maior dificuldade em moderar as temperaturas extremas, dependendo mais de sistemas de climatização artificial para garantir conforto.

4.6.2 Desempenho Higrotérmico Comparativo (Umidade)

Embora a NBR 15.575 não defina valores percentuais para umidade, seus requisitos de habitabilidade, saúde e durabilidade estão intrinsecamente ligados ao seu controle. A faixa de conforto ideal para a umidade relativa situa-se entre 40% e 60%, níveis que previnem a proliferação de mofo, bolor e a degradação dos materiais.

Edificação em Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico: Demonstrou um controle de umidade deficiente, com níveis persistentemente elevados em todas as estações. Os valores frequentemente ultrapassam 70%, atingindo picos de 82% no verão. Este excesso de umidade, especialmente quando combinado com altas temperaturas, resulta em uma sensação de "abafamento" e cria um ambiente propício para o desenvolvimento de patologias construtivas e respiratórias.

Edificação em Wood Frame: Apresentou um controle de umidade drasticamente superior, mantendo os níveis internos consistentemente dentro ou muito próximos da faixa de conforto ideal (40-60%) ao longo de todo o ano. Sua capacidade de "respirar" e o correto tratamento das camadas da envoltória evitaram o acúmulo de vapor d'água, mantendo o ambiente interno mais saudável e agradável.

O sistema Wood Frame atende de forma exemplar aos objetivos de salubridade e durabilidade da norma. Ao gerenciar eficazmente a umidade, ele mitiga o risco de condensação, mofo e ácaros, garantindo melhor qualidade do ar interno e protegendo a vida útil dos componentes. A alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, por sua vez, apresentou um desempenho que representa um risco maior à saúde dos ocupantes e à integridade da edificação.

4.6.3 Diretrizes Sugeridas para a Adequação da NBR 15.575 Wood Frame

TABELA 16 - Umidade relativa entre Alvenaria Convencional e Wood Frame - Verão

Propostas de Diretrizes para a Evolução da ABNT NBR 15.575		
Título da Proposta	Diretriz Sugerida	Justificativa
Anexo Técnico para Sistemas Leves	Desenvolver um anexo específico na norma que reconheça a diferença fundamental de comportamento entre sistemas de baixa inércia/alto isolamento (Wood Frame) e os de alta inércia/baixo isolamento (alvenaria).	A física das edificações leves é distinta. Um anexo técnico permitiria estabelecer métodos de avaliação e critérios mais adequados a essa realidade, promovendo a inovação e evitando a aplicação de premissas pensadas para a construção convencional.
Inclusão do Critério de Estabilidade Térmica	Adicionar, para os níveis de desempenho Intermediário e Superior, um critério quantitativo de estabilidade térmica, como a amplitude térmica máxima diária ou o desvio padrão máximo da temperatura interna.	Este estudo comprovou que a estabilidade é um indicador de conforto mais robusto que apenas valores de pico. A norma deveria reconhecer e quantificar esse fator de qualidade, premiando sistemas que oferecem ambientes internos menos suscetíveis a flutuações externas.
Incorporação de Parâmetros de Umidade Relativa	Estabelecer faixas recomendadas de umidade relativa interna (ex: 40-60%) como um critério explícito para os níveis de desempenho Intermediário e Superior nos quesitos de habitabilidade e saúde.	O controle da umidade é fundamental para a saúde e o conforto. Formalizar este critério na norma elevaria o padrão da qualidade do ar interior nas edificações brasileiras e valorizaria sistemas, como o Wood Frame, que demonstram performance

		superior neste aspecto.
Requisitos de Estanqueidade ao Ar para Alta Performance	Para os níveis de desempenho mais elevados, incluir requisitos de estanqueidade ao ar da envoltória (medidos em trocas de ar por hora - ACH) e recomendar métodos de verificação, como o ensaio de Blower Door.	A eficiência do isolamento em sistemas leves é maximizada pela estanqueidade. Adoção deste critério garante que o desempenho projetado seja alcançado na prática, alinhando a normativa brasileira aos mais avançados padrões internacionais de construção de alta eficiência energética.

FONTE: Autor (2025).

A análise conjunta dos dados descritivos, da validação estatística e da visualização gráfica demonstrou inequivocamente a superioridade do desempenho térmico e higrotérmico da edificação em Wood Frame em comparação à Alvenaria Convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, sob as condições analisadas. Fica comprovado que o sistema não apenas mantém os ambientes internos mais estáveis, mas também mais quentes no inverno e mais frescos no verão. Diante dessas evidências empíricas, o capítulo final, Considerações Finais, se dedicará a discutir as implicações mais amplas destes resultados para o conforto, a saúde, a eficiência energética e a conformidade com a NBR 15.575. Adicionalmente, serão consolidadas as contribuições desta tese e propostas recomendações para trabalhos futuros que possam expandir o conhecimento gerado.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo, representa um passo significativo na compreensão das variáveis determinantes para o desempenho termo energético e sustentabilidade ambiental em construções habitacionais.

Até o momento, conduziu-se a análise preliminar das condicionantes térmicas dos protótipos, estabelecendo uma base sólida de dados iniciais. Esta etapa proporcionou insights valiosos, demonstrando a influência direta das estratégias construtivas na resposta térmica dos edifícios. No entanto, é imperativo ressaltar que esta fase representa apenas o primeiro passo em direção a uma compreensão completa e abrangente do desempenho das edificações em estudo.

A próxima etapa da pesquisa será dedicada à coleta de dados em diferentes estações do ano, considerando as variações associadas aos solstícios e equinócios. A escolha de uma semana neutra em relação às condições climáticas médias assegurará uma avaliação equitativa, permitindo uma comparação precisa entre os dois tipos de edificação. Este próximo estágio oferecerá uma visão mais detalhada e contextualizada do desempenho térmico, enriquecendo nossas conclusões.

Além disso, é crucial destacar a importância da avaliação do crédito de carbono associado a cada modelo de protótipo. Esta análise crítica será instrumental na determinação do impacto ambiental relativo de ambas as tipologias construtivas. A compreensão dos benefícios ambientais e da eficiência energética associados a cada sistema é vital para uma tomada de decisão informada. À medida que avançamos nessa jornada de pesquisa, é evidente que o trabalho não apenas contribuirá para o aprimoramento das práticas construtivas, mas também proporcionará insights valiosos para a sustentabilidade do setor. Espera-se que este estudo possa servir como uma referência para futuras iniciativas voltadas à otimização do desempenho termo energético e redução do impacto ambiental nas construções habitacionais.

Embora a quantificação da pegada de carbono não tenha sido o escopo central desta tese, os resultados obtidos permitem uma inferência qualitativa sobre o potencial de cada sistema construtivo neste quesito. A edificação em alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico, intensiva no uso de cimento e aço, carrega uma elevada energia embutida e emissões de CO₂ associadas à sua

produção, posicionando-se como um sistema de alto impacto ambiental inicial. Em contrapartida, o sistema Wood Frame, ao utilizar madeira de reflorestamento como principal matéria-prima — um recurso renovável que armazena carbono biogênico —, apresenta um perfil intrinsecamente mais sustentável. Esta distinção fundamental sugere que, enquanto a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico representa o cenário base (business-as-usual) em análises de ciclo de vida, o Wood Frame se posiciona como uma tecnologia de descarbonização, com potencial não apenas para reduzir, mas para gerar um balanço de carbono negativo. A validação quantitativa desta hipótese, contudo, demandaria uma complexa Análise de Ciclo de Vida (ACV), uma linha de pesquisa que, conforme detalhado adiante, representa uma relevante sugestão para trabalhos futuros.

Esta tese alcançou seu objetivo principal ao realizar uma comparação multifacetada do desempenho de conforto térmico entre a edificação convencional ou alvenaria de bloco cerâmico e a em Wood Frame, validada por dados coletados em condições reais de uso. A metodologia empregada, que combinou análise descritiva, inferencial e gráfica, permitiu comprovar estatisticamente a superioridade do sistema Wood Frame em proporcionar um ambiente interno mais estável, confortável e energeticamente mais eficiente ao longo de todas as estações do ano. Ao posicionar o Wood Frame como uma alternativa tecnologicamente superior sob a ótica do desempenho e da sustentabilidade, este trabalho não apenas preenche uma lacuna na literatura técnica nacional, mas também fornece subsídios concretos para a evolução do setor da construção civil em direção a práticas mais alinhadas às exigências contemporâneas por edificações mais responsáveis e de maior qualidade para o usuário final.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo estabeleceu uma base ao comprovar a superioridade de desempenho térmico e higrotérmico do sistema Wood Frame em comparação com a alvenaria convencional ou alvenaria de bloco cerâmico. A partir das conclusões e limitações desta pesquisa, emergem diversas oportunidades para investigações futuras que podem expandir significativamente o conhecimento na área, sendo estas as recomendações.

1 - Aprofundamento da Análise de Ciclo de Vida (ACV) e Crédito de Carbono. Sugere-se a realização de uma Análise de Ciclo de Vida (ACV) completa e quantitativa, indo além do desempenho operacional para calcular o carbono embutido (emissões da extração de materiais, fabricação, transporte e construção) e o carbono biogênico (sequestrado pela madeira). O objetivo dessa análise seria quantificar com precisão a pegada de carbono total de cada edificação, validando o potencial real do sistema Wood Frame para a geração de créditos de carbono e, assim, fornecer dados concretos para políticas de incentivo à construção de baixo carbono.

2 - Análise de Viabilidade Econômica em Ciclo de Vida (LCC - Life Cycle Costing). Propõe-se uma investigação que consistiria em um estudo de custo comparativo que não se limite ao valor inicial da construção, mas que inclua os custos operacionais (economia de energia com climatização, manutenção) e o valor residual ou de descarte. O propósito seria demonstrar se a superior eficiência energética do Wood Frame, comprovada nesta tese, se traduz em um menor custo total de propriedade (TCO) ao longo do tempo, fornecendo um argumento econômico sólido para sua adoção pelo mercado.

3 - Expansão da Análise para Outros Requisitos da NBR 15.575. Recomenda-se a realização de medições de campo para avaliar o desempenho acústico (isolamento de ruído aéreo e de impacto) dos dois sistemas, além de uma análise comparativa, teórica e por simulação, sobre o desempenho de segurança contra incêndio. Tal estudo forneceria uma visão holística da conformidade de ambos os sistemas com a norma, complementando a análise térmica e abordando preocupações comuns do mercado em relação a sistemas leves.

4 - Validação Externa em Diferentes Zonas Bioclimáticas. Seria de grande valor replicar a metodologia deste estudo em outras zonas bioclimáticas do Brasil, como o clima quente e úmido do Norte/Nordeste ou o clima de altitude no Sudeste. Isso permitiria verificar se a superioridade de desempenho do Wood Frame se mantém sob diferentes regimes climáticos, ampliando a validade externa e a aplicabilidade das conclusões para um contexto nacional.

5 - Monitoramento Contínuo e Análise de Degradação de Desempenho. Esta linha de pesquisa envolveria um monitoramento prolongado dos protótipos, por um período superior a um ano contínuo, para capturar a sazonalidade completa e

eventos atípicos. Um estudo longitudinal de longo prazo (5-10 anos) poderia ainda avaliar a degradação do desempenho. O objetivo seria aumentar a robustez estatística dos dados e investigar a durabilidade real do desempenho térmico de cada sistema, um aspecto fundamental da NBR 15.575.

6 - Análise da Percepção e Comportamento do Usuário (Avaliação Pós-Ocupação - APO). Por fim, recomenda-se complementar os dados quantitativos de monitoramento com uma abordagem qualitativa, através de questionários, entrevistas e diários com os moradores. O propósito final seria correlacionar o desempenho técnico medido com a satisfação real e o conforto percebido pelos usuários, investigando como eles interagem com a edificação e se o melhor desempenho do Wood Frame se traduz, de fato, em um maior bem-estar

As recomendações apresentadas demonstram a fecundidade do tema e apontam para a continuidade da pesquisa científica como um processo dinâmico e colaborativo. A execução destes e de outros estudos futuros dependerá, invariavelmente, do arcabouço teórico e empírico estabelecido por pesquisas anteriores. Sendo assim, a seção final deste trabalho apresenta as Referências Bibliográficas que fundamentaram cada etapa desta investigação, reconhecendo as contribuições da comunidade científica que tornaram esta tese possível.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220-3**: Desempenho térmico de edificações — Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro, 2021.

ALLEN, Edward; THALLON, Rob. **Fundamentals of residential construction**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, dez. 2013.

ALVES, Bruno Sales; PONCIANO, Thais Carneiro. **Comparativo de viabilidade entre os sistemas construtivos wood frame e alvenaria convencional para residências de pequeno porte na região do médio Piracicaba**. 2018. 57 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade Doctum de João Monlevade, João Monlevade, 2018. Disponível em: [https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/2040/1/COMPARATIVO%20DE%20VIABILIDADE%20\[...\]](https://dspace.doctum.edu.br/bitstream/123456789/2040/1/COMPARATIVO%20DE%20VIABILIDADE%20[...].). Acesso em: 15 set. 2023.

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. [S.l.]: Arduino, [20--?]. *[Nota: Substitua pelo ano correto e o URL da página do produto/datasheet]*. Disponível em: <[URL]>. Acesso em: [dia mês. ano].

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **[Título da Norma ou Publicação de 2005]**. Atlanta: ASHRAE, 2005.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55-2020**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2020.

BALTAR, M. G.; KAEHLER, J. W. M.; PEREIRA, L. A. **O Fator Energia na Construção Civil**. Porto Alegre: Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2006.

BERALDO, A. L. **[Título do livro ou artigo sobre conforto térmico e paisagismo]**. [Local]: [Editora], 2006.

BERRIEL, A. **Tectônica e poética das casas de tábuas**. Curitiba: Instituto Arquibrasil, 2011. (A casa de araucária: arquitetura da madeira em Curitiba; 3).

BLOMQUIST, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre conforto acústico em Wood Frame]**. **[Nome do Periódico]**, v. X, n. Y, p. Z-W, 2016.

BRÜGGEMANN, Carolina. **Comparativo entre alvenaria e Wood Frame ao longo da vida útil**. 2017. 131 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

CARVALHO, [Nome] et al. **[Título do artigo ou livro sobre normas de desempenho]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

CASTRO, [Nome]. **[Título do artigo ou livro sobre eficiência energética e consumo de recursos]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2015.

CEM INSTRUMENTS. **Termo-Higrômetro Digital DT-322**. [S.l.]: CEM, [20--?]. *[Nota: Encontre o manual ou a página oficial do produto para a referência completa]*. Disponível em: <[URL]>. Acesso em: [dia mês. ano].

CHAVES, V. M. **Eficiência Energética: medidas que resolvem**. 2018. 91 p. Monografia (Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

CHEPP, Ellen David; GASPARIN, Fabiano Perin. Análise de medidas de eficiência térmica no consumo energético e conforto térmico de uma edificação. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 5, n. 3, p. 236-249, 2019.

CHURKINA, Galina et al. Buildings as a global carbon sink. **Nature Sustainability**, v. 3, p. 269–276, 2020.

CONSTRUINDO DECOR. **Wood Frame: O que é, benefícios, fotos e preços**. 2023. Disponível em: <https://construindodecor.com.br/wood-frame/>. Acesso em: 20 set. 2023.

CORREA, L. A.; CLARK, G.; FRIAS, L. S. Energia solar e planejamento estatal no Brasil: uma análise à luz do direito econômico. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. 11, n. 3, p. 369-386, 2021.

COSTA, J. dos S.; ANDRADE JUNIOR, L. M. L. de. Energy efficiency applied to electricity consumption: A bibliographic review study. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 4, e55510414364, 2021.

CUCE, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre inércia térmica e Wood Frame]**. **[Nome do Periódico]**, v. X, n. Y, p. Z-W, 2020.

CUNHA, [Nome] et al. **[Título do artigo ou livro sobre durabilidade de estruturas de concreto]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

DE DEAR, Richard; BRAGER, Gail S. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions**, v. 104, n. 1, p. 145-167, 1998.

DUARTE, [Nome]. **[Título do artigo ou livro sobre conforto térmico e design passivo]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2016.

ELLINGWOOD, Bruce R.; RITTER, Michael A. **[Título do artigo sobre resistência sísmica em Wood Frame]**. [Nome do Periódico ou Conferência], 2017.

FANGER, Povl Ole. **Thermal comfort**: analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FENG, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre resistência sísmica de construções em Wood Frame]**. [Nome do Periódico], v. X, n. Y, p. Z-W, 2017.

FERREIRA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre a NBR 15.575 e segurança estrutural]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2018.

FRIEDMANN, [Nome]. **[Título do artigo ou livro sobre eficiência energética em Wood Frame]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2019.

GIVONI, Baruch. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings**, v. 18, n. 1, p. 11-23, 1992.

GOMES, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre desempenho acústico em alvenaria]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2019.

GRATTAN, R.; THOMAS, A. **[Título do artigo ou livro sobre flexibilidade arquitetônica em Wood Frame]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2016.

GURGEL, Mirian. **Design Passivo – baixo consumo energético**: guia para conhecer, entender, e aplicar os princípios do design passivo em residenciais. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2012.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades e Estados**: Cascavel. 2021. *[Nota: Verificar o link exato e a data de acesso no site do IBGE]*. Disponível em: <[URL]>. Acesso em: [dia mês. ano].

JOHN, Vanderley M.; OLIVEIRA, Luciana A. de. **[Título do artigo ou livro sobre verificação e desempenho na construção civil]**. [Nome do Periódico ou Editora], 2017.

KIBERT, Charles J. et al. **[Título do livro "Sustainable Construction" ou artigo relacionado]**. [Local]: [Editora], 2016.

KUCHEN, E.; FISCH, M. N. Aletria dos modelos de conforto térmico adaptativo e PMV em edificações de escritórios naturalmente ventiladas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 55-69, out./dez. 2009.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LabEEE. **AnalysisBIO 2.2**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, [20--?]. Software.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LabEEE. **AnalysisSOL**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, [20--?]. Software.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2014.

LI, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre inércia térmica em diferentes climas]**. **[Nome do Periódico]**, v. X, n. Y, p. Z-W, 2019.

LIMA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre flexibilidade em alvenaria convencional]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

LIMA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre conforto térmico e produtividade]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2019.

LIMA, A.; SOUZA, H. **[Título do artigo ou livro sobre a NBR 15.575 e desempenho acústico]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2020.

LOPES, Eduardo C. A. **Tecnologias Sustentáveis em Obras de Pequeno e Médio Porte – Custos, Vantagens e Desvantagens no uso de Wood Frame**. 2013. 23 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2013.

MARQUES, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre armazenamento de carbono em madeira]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

MELO, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre pontes térmicas em edificações]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. Sistema construtivo em wood frame para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 31, n. 2, p. 143-156, 2010.

MOLAR-OROZCO, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre consumo energético e conforto]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2020.

MOURA, [Nome]; MOTTA, [Nome]. **[Título do artigo ou livro sobre energia solar e eficiência energética]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2013.

NICOL, J. Fergus; HUMPHREYS, Michael A. Adaptive thermal comfort and sustainable building design. **Advances in building energy research**, v. 1, n. 1, p. 1-32, 2002.

NOGUEIRA, S. P. **Eficiência energética em instalações elétricas de baixa tensão**: teoria e aplicação de métodos para melhoria da eficiência energética em um estudo de caso. 2019. 102 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Energia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

OLIVEIRA, E. **Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e o co2 embutidos no sistema construtivo Wood Frame**. 2016. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

OLIVEIRA, J.; BITTENCOURT, L. **[Título do artigo ou livro sobre a evolução da NBR 15.575]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2016.

PARKINSON, Thomas et al. A review of mixed-mode buildings: a state of the art. **Applied Energy**, v. 263, 114624, 2020.

PFEIL, Walter. **Estruturas de madeira**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

PRAZERES, Fabiano da Silva; ALBERTI, Eduarda Grobe; ARAKAWA, Flavia Sayuri. Sistema construtivo em wood frame como alternativa inovadora para o desenvolvimento sustentável no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 8, n. 3, p. 20360-20380, mar. 2022.

SALENIKOVICH, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre propriedades da madeira em Wood Frame]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2019.

SANTOS, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre VUP e manutenção]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2019.

SANTOS, R.; RIBEIRO, F. **[Título do artigo ou livro sobre durabilidade e NBR 15.575]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2021.

SCRIVENER, Karen L. et al. Calcined clay limestone cements (LC³). **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 49-56, 2018.

SHIGUE, E. K. **Difusão da Construção em Madeira no Brasil: Agentes, ações e produtos**. 2018. 250 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SILVA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre inércia térmica em alvenaria]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2017.

SILVA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre longevidade de estruturas de concreto]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2018.

SILVA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre aplicabilidade da NBR 15.575]**. **[Nome do Periódico ou Editora]**, 2019.

SILVA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre segurança estrutural e NBR 15.575]. [Nome do Periódico ou Editora], 2020.**

SIMÕES, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre isolamento térmico em Wood Frame]. [Nome do Periódico ou Editora], 2020.**

SOUZA, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre qualidade construtiva e mão de obra]. [Nome do Periódico ou Editora], 2017.**

STRAUBE, J.; BURNETT, E. **[Título do livro "Building Science for Building Enclosures" ou artigo relacionado]. [Nome do Periódico ou Editora], 2018.**

TAGUCHI, [Nome] et al. **[Título do artigo sobre consumo de energia na produção de materiais]. [Nome do Periódico ou Editora], 2019.**

THALLON, Rob. **Graphic Guide to Frame Construction.** Newtown: Taunton Press, 2008.

VASQUES, [Nome]. **[Título do artigo ou livro sobre desafios do Wood Frame no Brasil]. [Nome do Periódico ou Editora], 2014.**