MURARI, Alexandre Rodriguez. **Avaliação do desempenho termoacústico de painéis de vedação vertical em Wood Frame. Estudo de caso: habitação unifamiliar em São Carlos - SP.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A construção civil é um dos setores com maior impacto ambiental, decorrentes do uso elevado de recursos naturais como matérias-primas e pela geração de resíduos. No Brasil ainda são utilizados em larga escala sistemas construtivos convencionais como os em alvenaria e em concreto armado, que muitas vezes empregam materiais de baixa qualidade e com alto impacto ambiental e social, como blocos e telhas cerâmicas fabricados de forma irregular em olarias clandestinas. A madeira, um material de construção de fonte renovável, possui características vantajosas relativas à sustentabilidade, assim como boa trabalhabilidade e relação peso específico/resistência, podendo ser utilizada combinada a outros materiais na industrialização de componentes de madeira, como painéis de vedação vertical, pisos e coberturas, sendo facilmente transportado e montado em obra, de forma racional, com controle de qualidade e custos, desde a fase de projeto, e baixa geração de resíduos. Vale ressaltar, que como a madeira é um material de origem orgânica, ela é passível da ação de deterioração por organismos xilófagos e intempéries, o que faz com que a etapa de projeto e o adequado detalhamento de todos os componentes deve ser cuidadoso, respeitando as características geográficas (climáticas) do local onde o sistema construtivo será empregado. Para que uma construção possa caminhar no sentido da sustentabilidade, ela deve conciliar os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O sistema construtivo em wood frame consiste em painéis estruturados em madeira de floresta plantada tratada autoclavada, combinada com diferentes materiais para revestimento interno e externo, com materiais isolantes no seu interior, para proteção a intempéries, contra o fogo e para melhorar o desempenho termoacústico. É um sistema construtivo a seco, que apresenta baixa geração de resíduos, mas ainda é pouco aceito e empregado no Brasil. Novos sistemas construtivos visam aumentar a qualidade e a competitividade, por meio de construções racionais, sustentáveis e competitivas. Este trabalho tem como objetivo apresentar as características do sistema construtivo wood frame, avaliar o desempenho termoacústico dos painéis de vedação verticais deste sistema por meio de ensaios de campo realizados com base na norma brasileira de desempenho ABNT NBR 15575 (2013) em uma habitação unifamiliar em wood frame, discorrer sobre a resistência ao fogo e os tratamentos utilizados atualmente nos componentes de madeira deste sistema, de modo a corroborar seu potencial e empregabilidade para construção de habitações no Brasil. Foram feitos baseados na norma ABNT NBR 15575 (2013) ensaios pelo método de engenharia em campo para determinação do desempenho acústico. Foram feitas medições in loco da temperatura do ar externa a edificação e interna nos dormitórios, o cálculo das propriedades térmicas de condutibilidade térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos painéis de vedação vertical externos, e a área de aberturas para ventilação, para determinação do desempenho térmico. Os resultados obtidos foram satisfatórios, atendendo aos requisitos de desempenho estabelecidos pela norma de desempenho vigente. Desta forma foi evidenciada a viabilidade da utilização deste sistema construtivo para locais com características climáticas semelhantes a da cidade de São Carlos - SP.

Palavras-chave: painéis de vedação vertical. wood frame. desempenho. ABNT NBR 15575 (2013). sustentabilidade.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOACÚSTICO DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO VERTICAL EM WOOD FRAME

ESTUDO DE CASO: HABITAÇÃO UNIFAMILIAR EM SÃO CARLOS – SP

Alexandre Rodriguez Murari

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

**SÃO CARLOS – SP
JULHO DE 2018**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo
Área de concentração: Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

ALEXANDRE RODRIGUEZ MURARI

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TERMOACÚSTICO DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO
VERTICAL EM *WOOD FRAME*. ESTUDO DE CASO: HABITAÇÃO UNIFAMILIAR
EM SÃO CARLOS – SP**

(versão corrigida)

Dissertação apresentada ao Instituto de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de
São Paulo, como requisito para a obtenção do
Título de Mestre em Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia.

Orientador: **Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos**

SÃO CARLOS – SP
JULHO DE 2018

AUTORIZO A REPRODUCAO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRONICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo autor

Murari, Alexandre Rodriguez
MM972a Avaliação de desempenho de painéis de vedação vertical em wood frame. Estudo de caso: habitação unifamiliar em São Carlos - SP / Alexandre Rodriguez Murari; orientador Javier Mazariegos Pablos. -- São Carlos, 2018.
134 p.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2018.

1. painéis de vedação vertical. 2. wood frame. 3. desempenho. 4. NBR 15575 (2013). 5. sustentabilidade. I. Pablos, Javier Mazariegos, orient. II. Título.

Bibliotecária responsável pela estrutura de catalogação da publicação de acordo com a AACR2:
Brianda de Oliveira Ordonho Sígolo - CRB - 8/8229

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Alexandre Rodriguez Murari**

Título da dissertação: **"Avaliação do desempenho termoacústico de painéis de vedação em Wood Frame. Estudo de caso: habitação unifamiliar em São Carlos/SP"**.

Data da defesa: **04/07/2018**

Orientador: Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos

Comissão Julgadora:**Resultado:**

Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos
(IAU/USP)

Não votante

Prof. Dr. Eduvaldo Paulo Sichieri
(IAU/USP)

APROVADO

Prof. Dr. Francisco Rocco Lahr
(EESC/USP)

APROVADO

Prof. Dr. Érico Maziero
(DECiv/ UFSCar)

APROVADO

Coordenador e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: **Prof. Dr. Tomás Antonio Moreira.**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais João Benedito Murari (in memoriam) e Maria Donato Rodriguez Murari (in memoriam). À minha esposa Reila pelo carinho e compreensão e ao meu filho Pedro por ser uma fonte de motivação e alegria.

GRATIDÃO

Ao prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos pela acolhida, pelo exemplo de ser humano e pela amizade. Ao amigo Victor José dos Santos Baldan pelo companheirismo e amizade.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela existência.

Aos meus familiares, em especial aos meus irmãos Regina, Ana, Giovani e André, aos meus cunhados Sérgio, Fabrício, Luzinete e Danille, aos meus sobrinhos Rafael, Vitor, Maria Eduarda, Heitor e Lucas, e a Cristina, Lenon e Bruna, pelo suporte e bons momentos.

Aos meus amigos de infância Gerson, Tiago, Gustavo e Emerson pela amizade e bons momentos.

A todos os meus amigos de São Carlos e USP, em especial ao Alison Simeão, Cristiano Sampaio, Érica Gibin, Fabiano de Oliveira, João Victor e Evelyn, Wiemaruey, pela amizade e aprendizado.

Ao Prof. Dr. João Alexandre Widmer por toda ajuda e amizade durante minha primeira graduação.

À Prof.^a Assoc. Akemi pela oportunidade de participar do grupo Habis e pelo aprendizado e incentivo.

Ao Prof. Dr. Samuel Giongo, a Eng.^a Cilene de Cássia e ao Arq. Eduardo Silva pela oportunidade e aprendizado em meu período de estágio na SEF.

À Prof.^a Dr.^a Esther de Almeida Prado Rodrigues pelo suporte e amizade durante minha segunda graduação.

Ao amigo Rodolfo Sertori pelo auxílio e incentivo para o meu ingresso no programa de pós-graduação do IAU/USP.

Ao Prof. Dr. Javier Mazariegos Pablos pela orientação acadêmica e pessoal, pelo incentivo, sabedoria e amizade.

Ao Prof. Tit. Francisco Antonio Rocco Lahr sempre atencioso e ciente em seus aconselhamentos.

Ao Eng. Guilherme Côrrea Stamato por todo auxílio, generosidade e perspicácia em seus aconselhamentos.

Ao Prof. Tit. Eduvaldo Paulo Sichieri por todo auxílio, amizade e objetividade em suas explicações.

Ao prof. Dr. Bruno Luis Damineli e aos alunos da turma de 2016 do curso de Engenharia Civil da USP de São Carlos pelo aprendizado e troca de experiências.

À prof. Assoc. Rosana Maria Caram por todo auxílio e generosidade, sempre paciente em seus apontamentos.

Aos funcionários do Laboratório de Construção Civil (LCC IAU/USP), em especial técnicos Paulo Pratavieira, Pedro Henrique Silva Mattia e Sérgio Trevelin pela amizade e auxílio nas atividades de pesquisa.

A todos os funcionários do IAU/USP, em especial a Flávia Cavalcanti Macambyra e Mara Aparecida Lino dos Santos pelo suporte.

Aos meus amigos do IAU/USP, Bojana, Nayara, Simone Tavares e Victor pelo apoio e troca de experiências.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido que viabilizou este trabalho de pesquisa.

E a todos que contribuíram para conclusão deste trabalho.

“Entendo por razão, não a faculdade de raciocinar, que pode ser bem ou mal utilizada, mas o encadeamento das verdades que só pode produzir verdades, e uma verdade não pode ser contrária a outra”

Gottfried W. Leibniz (1646-1716)

RESUMO

MURARI, Alexandre Rodriguez. **Avaliação do desempenho termoacústico de painéis de vedação vertical em *Wood Frame*. Estudo de caso: habitação unifamiliar em São Carlos - SP.** Dissertação de Mestrado (Mestrado em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

A construção civil é um dos setores com maior impacto ambiental, decorrentes do uso elevado de recursos naturais como matérias-primas e pela geração de resíduos. No Brasil ainda são utilizados em larga escala sistemas construtivos convencionais como os em alvenaria e em concreto armado, que muitas vezes empregam materiais de baixa qualidade e com alto impacto ambiental e social, como blocos e telhas cerâmicas fabricados de forma irregular em olarias clandestinas. A madeira, um material de construção de fonte renovável, possui características vantajosas relativas à sustentabilidade, assim como boa trabalhabilidade e relação peso específico/resistência, podendo ser utilizada combinada a outros materiais na industrialização de componentes de madeira, como painéis de vedação vertical, pisos e coberturas, sendo facilmente transportado e montado em obra, de forma racional, com controle de qualidade e custos, desde a fase de projeto, e baixa geração de resíduos. Vale ressaltar, que como a madeira é um material de origem orgânica, ela é passível da ação de deterioração por organismos xilófagos e intempéries, o que faz com que a etapa de projeto e o adequado detalhamento de todos os componentes deve ser cuidadoso, respeitando as características geográficas (climáticas) do local onde o sistema construtivo será empregado. Para que uma construção possa caminhar no sentido da sustentabilidade, ela deve conciliar os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O sistema construtivo em *wood frame* consiste em painéis estruturados em madeira de floresta plantada tratada autoclavada, combinada com diferentes materiais para revestimento interno e externo, com materiais isolantes no seu interior, para proteção a intempéries, contra o fogo e para melhorar o desempenho termoacústico. É um sistema construtivo a seco, que apresenta baixa geração de resíduos, mas ainda é pouco aceito e empregado no Brasil. Novos sistemas construtivos visam aumentar a qualidade e a competitividade, por meio de construções racionais, sustentáveis e competitivas. Este trabalho tem como objetivo apresentar as características do sistema construtivo *wood frame*, avaliar o desempenho termoacústico dos painéis de vedação verticais deste sistema por meio de ensaios de campo realizados com base na norma brasileira de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013) em uma habitação unifamiliar em *wood frame*, discutir sobre a resistência ao fogo e os tratamentos utilizados atualmente nos componentes de madeira deste sistema, de modo a corroborar seu potencial e empregabilidade para construção de habitações no Brasil. Foram feitos baseados na norma NBR 15575 (ABNT, 2013) ensaios pelo método de engenharia em campo para determinação do desempenho acústico. Foram feitas medições *in loco* da temperatura do ar externa a edificação e interna nos dormitórios, o cálculo das propriedades térmicas de condutibilidade térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos painéis de vedação vertical externos, e a área de aberturas para ventilação, para determinação do desempenho térmico. Os resultados obtidos foram satisfatórios, atendendo aos requisitos de desempenho estabelecidos pela norma de desempenho vigente. Desta forma foi evidenciada a viabilidade da utilização deste sistema construtivo para locais com características climáticas semelhantes a da cidade de São Carlos - SP.

Palavras-chave: painéis de vedação vertical. *wood frame*. desempenho. NBR 15575 (ABNT, 2013). sustentabilidade.

ABSTRACT

MURARI, Alexandre Rodriguez. Evaluation of the thermoacoustic performance of vertical frame panels in Wood Frame. Case study: single-family housing in São Carlos - SP. Dissertation (Master of Architecture, Urbanism and Tecnology) – Institute of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, São Paulo, 2018.

Civil construction is one of the sectors with the greatest environmental impact, resulting from the high use of natural resources as raw materials and the generation of waste. In Brazil, conventional construction systems such as masonry and reinforced concrete are still used in large scale, which often use low quality materials with high environmental and social impact, such as blocks and irregularly manufactured ceramic tiles in clandestine pottery. Wood, a renewable source construction material, has advantageous characteristics related to sustainability, as well as good workability and specific weight / resistance ratio, and can be used in combination with other materials in the industrialization of wood components such as vertical fence panels, floors and roofing, being easily transported and assembled in a rational way, with quality control and costs, from the design phase, and low waste generation. It is worth noting that, since wood is a material of organic origin, it is susceptible to deterioration by xylophagous and weathering organisms, which means that the design stage and the adequate detailing of all the components must be careful, respecting the geographic (climatic) characteristics of the place where the construction system will be employed. For a construction to move towards sustainability, it must reconcile environmental, economic and social aspects. The construction system in wood frame consists of panels structured in autoclaved treated planted wood, combined with different materials for internal and external coating, with insulation materials inside, for protection against the elements, against fire and to improve thermoacoustic performance. It is a dry construction system, which presents low generation of waste, but is still little accepted and used in Brazil. New constructive systems aim to increase quality and competitiveness by means of rational, sustainable and competitive constructions. The objective of this work is to present the characteristics of the wood frame construction system, to evaluate the thermoacoustic performance of the vertical sealing panels of this system by means of field tests carried out based on the Brazilian performance standard NBR 15575 (ABNT, 2013) in a single family dwelling in wood frame, to discuss the fire resistance and treatments currently used in the wood components of this system, in order to corroborate its potential and employability for housing construction in Brazil. Based on the NBR 15575 (ABNT, 2013) tests were made by the field engineering method to determine the acoustic performance. Measurements were made in loco of internal and external air temperature in the dormitories, calculation of the thermal conductivity (U) and thermal capacity (CT) properties of external vertical sealing panels, and the area of ventilation openings, for determination of thermal performance. The results were satisfactory, meeting the performance requirements established by the current performance standard. In this way, the feasibility of the use of this constructive system for places with climatic characteristics similar to the city of São Carlos -SP.

Keywords: vertical panels. wood Frame. performance. NBR 15575 (ABNT, 2013). sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fabricação de painéis em <i>Wood frame</i>	12
Figura 2 - Diferentes materiais utilizados nos painéis de vedação vertical.....	13
Figura 3 - Montagem dos painéis em obra	14
Figura 4 – Detalhe de uma fundação do tipo <i>basement wall</i>	15
Figura 5 – Componentes do sistema de cobertura de uma edificação em <i>wood frame</i>	16
Figura 6 – (A) Residencial Aragano em fase construção. (B) Residencial Aragano concluído	18
Figura 7 – (A) Residencial Nilo em fase de construção. (B) Residencial Nilo concluído	18
Figura 8 – Zoneamento bioclimático brasileiro.....	24
Figura 9 – Índice de conforto proposto pela norma americana ANSI/ASHRAE 55-2013	31
Figura 10 – Estrutura metodológica	33
Figura 11 – Habitação em construção	34
Figura 12 – Habitação concluída.....	35
Figura 13 – (A) Zona bioclimática 4. (B) Carta bioclimática da zona 4	36
Figura 14 – Vedação vertical externa em <i>wood frame</i> e seus componentes	37
Figura 15 – Esquema do ensaio realizado em campo pelo método de engenharia para determinação do isolamento sonoro global da vedação externa.....	39
Figura 16 – Cômodos de maior ocupação da habitação em <i>wood frame</i> utilizados na coleta de dados de Temperatura interna do ar	43
Figura 17 – Medidor HOBO utilizado para a coleta de dados de Temperatura interna e externa do ar	45
Figura 18 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de maio de 2017 ..	49
Figura 19 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de maio de 2017.	50
Figura 20 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de maio de 2017.	51
Figura 21 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 23 a 25 maio de 2017.....	52
Figura 22 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 23 a 25 maio de 2017.....	53
Figura 23 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de agosto de 2017	54

Figura 24 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar na do dormitório 1 (suíte 1), no período de agosto de 2017.	55
Figura 25 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de agosto de 2017.	56
Figura 26 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 01 a 03 agosto de 2017	57
Figura 27 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 01 a 03 agosto de 2017	58
Figura 28 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de fevereiro de 2018	59
Figura 29 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar na do dormitório 1 (suíte 1), no período de fevereiro de 2018.	60
Figura 30 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de fevereiro de 2018.	61
Figura 31 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 08 a 10 fevereiro de 2018	62
Figura 32 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 08 a 10 maio de 2018.....	63
Figura 33 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 1 para o Dia típico de Verão	64
Figura 34 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 3 para o Dia Típico de Verão	66
Figura 35 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 1 para o Dia Típico de Inverno.....	68
Figura 36 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 3 para o Dia Típico de Inverno.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Área de abertura mínima de ventilação	26
Tabela 2 - Valores máximos admissíveis de transmitância térmica (C_T)	26
Tabela 3 - Valores mínimos admissíveis para capacidade térmica (C_T)	27
Tabela 4 - Parâmetros para avaliação do desempenho térmico de coberturas	27
Tabela 5 - Requisitos de desempenho no verão	28
Tabela 6 - Requisitos de desempenho no inverno	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Categorias de uso da madeira	19
Quadro 2 - Valores mínimos da diferença padronizada ponderada da vedação externa de dormitório	39
Quadro 3 - Níveis de desempenho da vedação vertical externa, relativos a diferença padronizada ponderada	40
Quadro 4 – Períodos de coleta dos dados de Temperatura interna e externa do ar	44
Quadro 5 – Resumo dos resultados da Diferença Padronizada de Nível para fachadas ($D_{2m,nT}$) e a Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,nT,w}$) para fachadas em dB nas medições	48
Quadro 6 – Critério e desempenho térmico para condições de verão – Dormitório 1	65
Quadro 7 – Critério e desempenho térmico para condições de verão – Dormitório 3	67
Quadro 8 – Critério e desempenho térmico para condições de inverno – Dormitório 1	69
Quadro 9 – Critério e desempenho térmico para condições de inverno – Dormitório 3	71
Quadro 10 – Requisito e resultado da transmitância térmica das paredes externas	72
Quadro 11 – Requisito e resultado da transmitância térmica das paredes externas	72
Quadro 12 – Requisito e resultado da área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar	73

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 - Diferença Padronizada de Nível a 2 m	41
Equação 2 - Diferença de Nível	41
Equação 3 - Diferença Ponderada de Nível a 2 m	41
Equação 4 - Diferença de Nível a 2 m	41

SUMÁRIO

RESUMO.....	xiii
ABSTRACT	xv
LISTA DE FIGURAS.....	xvii
LISTA DE QUADROS.....	xxi
LISTA DE TABELAS	xix
LISTA DE EQUAÇÕES	xxiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVO GERAL.....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
3.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	7
3.2 MADEIRA COM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO.....	8
3.3 O SISTEMA CONSTRUTIVO WOOD FRAME	10
3.3.1 Dimensionamento estrutural.....	11
3.3.2 Fabricação.....	12
3.3.3 Montagem.....	13
3.3.4 Elementos construtivos.....	14
3.3.5 Exemplos de conjuntos habitacionais em <i>Wood Frame</i> no Brasil	17
3.4 MADEIRA TRATADA	19
3.5 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DE ELEMENTOS DE MADEIRA	21
3.6 NBR 15220: DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES (ABNT, 2005).....	23
3.7 NBR 15575: EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS – DESEMPENHO (ABNT, 2013) ..	24
3.7.1 Desempenho térmico	25
3.8 ANSI/ASHRAE 55-2013	30

4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	<i>ESTRUTURA METODOLÓGICA.....</i>	33
4.2	<i>OBJETO DE ESTUDO.....</i>	34
4.3	<i>PAINÉIS DE VEDAÇÃO VERTICAL EM WOOD FRAME.....</i>	36
4.4	<i>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ACÚSTICO.....</i>	38
4.5	<i>AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO</i>	42
5	RESULTADOS.....	47
5.1	<i>DESEMPENHO ACÚSTICO</i>	47
5.2	<i>DESEMPENHO TÉRMICO</i>	48
5.2.1	Períodos de coleta de dados.....	48
5.2.2	Desempenho no verão	63
5.2.3	Desempenho no inverno	67
5.2.4	Adequação das vedações verticais externas	71
5.2.5	Aberturas para ventilação	72
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
8	CONCLUSÕES	79
9	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	81
	REFERÊNCIAS	83
	Apêndice A – Cálculo das propriedades térmicas dos painéis de vedação vertical em wood frame do objeto de estudo.....	91
	Apêndice B – Cálculo das propriedades térmicas da cobertura do objeto de estudo ...	97
	Apêndice C – Cálculo das áreas de abertura para ventilação	101
	Anexo A – Planta térrea do objeto de estudo	103
	Anexo B – Esquadrias do objeto de estudo.....	105
	Anexo C – Planta de cobertura do objeto de estudo.....	107

1 INTRODUÇÃO

A habitação pode ser definida como um bem de consumo com características particulares, com potencial de durabilidade elevado que pode ser superior a 50 anos. Como é um produto caro, as classes com poder econômico baixo são as que constituem a maior demanda imediata, concentrando-se principalmente nas periferias das grandes cidades (BONDUKI, 2014). A habitação de interesse social visa atender as classes com poder econômico pequeno, por meio de projetos e técnicas construtivas que se apresentem menos onerosas.

Programas habitacionais como o Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) do governo federal buscam, sem sucesso, diminuir o déficit habitacional brasileiro, através da construção de conjuntos habitacionais e linhas de crédito (SANTO AMORE; SHIMBO; RUFINO, 2015). Pode-se afirmar que as construtoras não priorizam a qualidade do produto habitação em seus empreendimentos, pois como visam o maior lucro possível, buscam atender somente o padrão mínimo exigido pelas Normas Técnicas, pela Legislação e pelos agentes de financiamento, e não levam em consideração aspectos relacionados ao grau de satisfação dos usuários e sim buscam formas para diminuição de custos, aumento da produtividade e redução de prazos (ROLNIK, 2015). Quase a totalidade dessas habitações é construída utilizando técnicas tradicionais, ou seja, moradias que empregam materiais como o concreto e aço e que tem um ciclo produtivo com largo uso de energia e alta geração de resíduos em comparação com materiais alternativos, como por exemplo, a madeira.

A construção civil é o setor com maior impacto ambiental, decorrentes do uso elevado de recursos naturais como matérias-primas e pela decorrente geração de resíduos. No entanto é o setor com maior potencial para empregar materiais reciclados (AGOPYAN; JOHN, 2011).

No Brasil ainda são utilizados em larga escala sistemas construtivos convencionais, que muitas vezes empregam materiais de baixa qualidade e com alto impacto ambiental e social, como os blocos e telhas cerâmicas fabricados de forma irregular em olarias clandestinas.

Para que uma construção possa caminhar no sentido da sustentabilidade, deve conciliar os aspectos ambientais, econômicos e sociais. O sistema construtivo em *wood frame* se enquadra neste sentido, por ser um sistema pré-fabricado, total ou parcialmente industrializado, que emprega mão-de-obra especializada e madeira de florestas plantadas como principal matéria-prima, que por sua vez demanda um projeto que respeite as limitações deste material e proteja os elementos em relação a umidade e a ação de organismos decompositores xilófagos (AWC, 2015). Além disso, apresenta baixa geração de resíduos, baixo consumo de água no

processo de produção, tempo reduzido para execução, mas ainda assim é pouco aceito e empregado no Brasil.

Novos sistemas construtivos visam aumentar a qualidade e a competitividade, por meio de construções racionais, sustentáveis e competitivas. No Brasil, o Ministério das Cidades, por meio do Programa Brasileiro de Qualidade de Produtividade do Habitat (PBQPH) busca homologar a utilização e o financiamento de novos sistemas construtivos, com foco na produção de habitações de interesse social (HIS), através de diretrizes e avaliações técnicas, por meio do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT).

Como exemplos, temos os sistemas construtivos que foram desenvolvidos e avaliados por meio de documentos de Avaliação Técnica (DaTec) emitidos por uma Instituição Técnica Avaliadora (ITA) credenciada. Pode-se citar os sistemas construtivos em paredes de concreto, de painéis industrializados de madeira de florestas plantadas (sistema construtivo *light wood frame*) homologado através da DATec SINAT No 020A (BRASIL, 2012), de painéis industrializados estruturados em aço (sistema construtivo *light steel frame*) e painéis de PVC.

Em relação à sustentabilidade, a madeira é um material de construção de fonte renovável e que durante sua fase de crescimento sequestra carbono da atmosfera. O Brasil possui um imenso potencial para a produção de habitações em madeira, com grandes áreas de reflorestamento, principalmente nas regiões Sudeste e Sul e com uma indústria madeireira estruturada (SZÜCS; VELLOSO; KRAMBECK, 2004).

A madeira possui características vantajosas, além das relativas à sustentabilidade, como boa trabalhabilidade, ótima relação peso específico/resistência, bom desempenho térmico, podendo ser utilizada combinada a outros materiais na industrialização de componentes de madeira, como painéis de vedação vertical, pisos e coberturas, sendo facilmente transportado e montado em obra, de forma racional, com controle de qualidade e custos, desde a fase de projeto, e baixa geração de resíduos. Vale ressaltar, que como a madeira é um material de origem orgânica, ela é passível da ação de deterioração por organismos xilófagos e intempéries, se for utilizada de maneira inadequada, o que faz com que a etapa de projeto e o adequado detalhamento de todos os componentes deve ser criterioso.

A utilização de sistemas construtivos em madeira para construção de habitações no Brasil é muito baixa, devido a diversos fatores. Do ponto de vista econômico, há fatores que dificultam seu uso e disseminação, como a pequena disponibilidade de mão-de-obra especializada, parque industrial voltado à produção de componentes para sistemas construtivos em madeira, oferta e disponibilidade de matéria-prima para este setor. O sistema construtivo em *wood frame*, um sistema leve, racional, com possibilidade de ser parcialmente ou totalmente

pré-fabricado apresenta-se adequado para ser empregado em habitações, por ter um desempenho satisfatório, ser um sistema racional e ainda pouco explorado no Brasil.

O sistema construtivo *wood frame* é um sistema industrializado, com diversas vantagens, relativas ao custo, com rápida execução, controle de qualidade dos componentes, e alta durabilidade. Basicamente, consiste em painéis estruturados em madeira de floresta plantada tratada autoclavada, combinada com diferentes materiais para revestimento interno e externo, com materiais isolantes no seu interior, para proteção de intempéries, contra o fogo e para melhorar o desempenho (MOLINA e CALIL J., 2010).

Mesmo sendo largamente utilizado na construção de habitações, em países como os EUA, Canadá, Japão, Alemanha, Nova Zelândia e Chile, ainda está em fase de implantação no Brasil, por diversos fatores, como os culturais, que implicam em uma baixa aceitação por parte dos usuários, que muitas vezes não conhecem o sistema construtivo *wood frame* e associam a madeira com desempenho inadequado quando utilizada em sistemas construtivos de habitações, em vista de exemplos de habitações de baixa qualidade executadas em madeira, de forma artesanal, sem projeto e matéria-prima adequados, ou até por imposições de mercado, pelo uso de estruturas predominantemente de concreto.

Este trabalho teve como objetivo apresentar as características do sistema construtivo em *wood frame* utilizado no Brasil, discutir as vantagens e desvantagens do sistema com base em avaliações de desempenho termoacústico com medições em campo, tendo em vista o fato de haver pouco trabalhos semelhantes com medições em campo e muitos trabalhos de simulação computacional, e desta forma, corroborar seu potencial e empregabilidade para construção de habitações no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo apresentar as características do sistema construtivo *wood frame*, avaliar o desempenho de uma habitação unifamiliar em *wood frame* localizada na cidade de São Carlos – SP por meio de ensaios de campo realizados com base na norma brasileira de desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), discorrer sobre a resistência ao fogo e tratamentos utilizados nos componentes de madeira deste sistema, de modo a corroborar seu potencial e empregabilidade para construção de habitações no Brasil.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o desempenho acústico, com base nos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), do objeto de estudo, uma habitação unifamiliar na cidade de São Carlos – SP, através de ensaios pelo método de engenharia em campo;

- Avaliar o desempenho térmico, com base nos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), do objeto de estudo, através de medições *in loco* da temperatura do ar externa a edificação e interna nos dormitórios, do cálculo das propriedades térmicas de transmitância térmica (U) e capacidade térmica (CT) dos painéis de vedação vertical externos, e da área de aberturas para ventilação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Desde a década de 1960, diversas discussões relacionadas a preservação do meio ambiente, como as da Eco 92, no Rio de Janeiro, Brasil, permeiam a sociedade, buscando gerar políticas e ações visando a manutenção do equilíbrio natural e da biodiversidade (CBS, 2015). O conceito de sustentabilidade, aplicado a atividade de construção civil, baseia-se no desenvolvimento de atividades, que conciliem de forma harmoniosa, os aspectos ambientais, econômicos e sociais.

A humanidade tem vivido com base num paradigma que contrapõe as necessidades das futuras gerações. O modelo de produção em que os bens são concebidos, projetados, construídos, utilizados e, após a vida útil, são acumulados no meio ambiente, onde o que se busca é um modelo fechado ou modelo cíclico de produção e consumo que faça parte do desafio do desenvolvimento sustentável (CALMON, 2007).

Na construção civil há uma crescente preocupação com a sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais, por meio da redução do uso de matérias-primas e energia, e geração de resíduos (AGOPYAN; JOHN, 2011).

Com a industrialização, o setor da construção civil contou com novos materiais, novos métodos construtivos e foi beneficiado com a capacidade de edificar rapidamente. Porém, como consequência, maior exploração dos recursos naturais para a produção de quantidades, cada vez maiores de materiais de construção e ainda muitos resíduos gerados pelas indústrias de transformação de matéria-prima e materiais de construção (NOGUEIRA, 2011).

Por sua vez, os profissionais do setor da construção civil, bem como todos os outros que estão relacionados com a indústria da construção civil, estão ligados às transformações ocorridas no meio ambiente e à exploração dos recursos naturais. Portanto, o desafio destes profissionais, é pensar em projetos e construções que diminuam a extração dos recursos naturais.

Construção sustentável é a que promove a renovação e reutilização de materiais, desde a concepção e projeto até a demolição, passando por todos os estágios do seu ciclo. Os materiais sustentáveis são aqueles que se enquadram no modelo cíclico de produção, ou seja, podem voltar para as fases iniciais de produção após sua vida útil.

A produção de materiais de construção consome aproximadamente 50% dos recursos naturais gastos no mundo (NOGUEIRA, 2011). Esse dado demonstra como a construção civil precisa transformar sua cadeia produtiva para contribuir com o desenvolvimento sustentável.

A sustentabilidade de um processo deve levar em consideração também a quantidade de resíduo gerado e a possibilidade de reaproveitamento desse material, cujas características muitas vezes permitem o derretimento e remodelação ou então a granulação e reutilização em outras funções, cujo impacto, portanto, será menor, e também conhecendo-se a quantidade de energia necessária para todas as fases do processo construtivo e do reuso da matéria-prima.

Novos sistemas construtivos visam aumentar a qualidade e a competitividade, por meio de construções racionais, sustentáveis e competitivas. No Brasil, o Ministério das Cidades, por meio do Programa Brasileiro de Qualidade de Produtividade do Habitat (PBQPH) busca viabilizar a utilização de novos sistemas construtivos, com foco na produção de habitações de interesse social (HIS), através de diretrizes e avaliações técnicas, por meio do Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT).

Como exemplos, temos os sistemas construtivos que foram desenvolvidos e avaliados por meio de documentos de Avaliação Técnica (DaTec) emitidos por uma Instituição Técnica Avaliadora (ITA) credenciada. Pode-se citar os sistemas construtivos em paredes de concreto, de painéis industrializados de madeira de florestas plantadas (*light wood frame*), de painéis industrializados estruturados em aço (*light steel frame*) e painéis de PVC.

3.2 MADEIRA COM MATERIAL DE CONSTRUÇÃO

A madeira é o único material de construção de fonte renovável e que durante a fase de crescimento da árvore, sequestra carbono da atmosfera. O Brasil possui um imenso potencial para a produção de habitações em madeira, com grandes áreas de reflorestamento, principalmente nas regiões Sudeste e Sul e com uma indústria madeireira estruturada (SZÜCS, VELLOSO e KRAMBECK, 2004).

A madeira possui características vantajosas, além das relativas à sustentabilidade, como boa trabalhabilidade e ótima relação peso específico/resistência, e bom desempenho térmico, podendo ser utilizada combinada a outros materiais na industrialização de componentes de madeira, como painéis de vedação vertical, pisos e coberturas, sendo facilmente transportado e montado em obra, de forma racional, com controle de qualidade e custos, desde a fase de projeto, e baixa geração de resíduos. Vale ressaltar, que como a madeira é um material de origem orgânica, ela é passível da ação de deterioração por organismos xilófagos e intempéries,

se for utilizada de maneira inadequada, o que faz com que a etapa de projeto e o adequado detalhamento de todos os componentes deve ser criterioso (BITTENCOURT, 1995).

Espécies de árvores de coníferas ou dicotiledôneas de baixa densidade utilizadas em locais com alta demanda biológica devem ser obrigatoriamente tratadas para evitar a decomposição por agentes xilófagos. A seleção das peças deve ser criteriosa, por meio de inspeção visual e ou mecânica, de forma que as peças selecionadas para uso em edificações sejam isentas de nós ou de defeitos naturais provenientes do crescimento da árvore, que podem afetar negativamente o desempenho dos componentes de madeira (ARAKAKI, 2000).

A madeira é uma alternativa viável para redução de custos e maior sustentabilidade, porém pouco realizada por diversos fatores, é o uso de técnicas alternativas como o uso da madeira na produção habitacional de interesse social, visto que este tipo de matéria-prima possui excelentes características como facilidade para manusear e boa relação entre resistência e peso próprio, além de ser um recurso sustentável e abundante no Brasil (INO, 2009).

Mesmo com boas vantagens para o seu uso, a madeira ainda assim, é pouco explorada no setor da construção civil por diversos fatores. Um exemplo que pode ser considerado como um dos mais importantes é o fator cultural, o que dificulta a aceitação da madeira no mercado por parte dos consumidores. Com isso, a oferta deste material no mercado se torna mais restrita, fazendo com que seu preço se torne elevado. Outra consequência direta da baixa procura é a pouca disponibilidade de mão-de-obra especializada para realização das técnicas construtivas em madeira já consolidadas em outros países, como o sistema construtivo *wood frame* (VALLE, 2011).

Uma das principais preocupações dos consumidores é em relação à qualidade e a durabilidade dos sistemas construtivos em madeira, em vista da utilização inadequada da madeira como matéria-prima em habitações precárias. Em geral, quando se utiliza a madeira como material de construção na execução de estruturas e painéis de vedação, de forma adequada, isto ocorre em projetos de alto padrão com custos elevados quando comparados a técnicas construtivas tradicionais já consolidadas em nosso país. A preocupação dos consumidores em relação a qualidade e a durabilidade se deve em grande parte ao uso inadequado do material por falta de conhecimento técnico e pela falta de estrutura industrial para prover material de qualidade, o que acabam por confirmar com exemplos negativos do uso da madeira em construções que apresentam desempenho insatisfatório, sobretudo em projetos de habitação de interesse social, promovidos por programas públicos de habitação (INO, 1991).

Sendo assim todo ciclo desde o projeto até a produção, passando pelo uso e manutenção da habitação em madeira deve ser avaliado para ampliar o conhecimento técnico e difundir a tecnologia no setor da construção civil e ampliar seu uso (ARAKAKI, 2000).

Em comparação com outros materiais como o concreto e o aço que são amplamente usados, há uma lacuna entre a tecnologia de madeira como material de construção. Além disso, somam-se grandes variações regionais do clima no Brasil, onde regiões mais quentes e úmidas podem acelerar o processo de deterioração deste material. O conhecimento do desempenho dos sistemas e componentes em madeira através de avaliações de desempenho é fundamental para ampliar o uso na construção civil, de forma a aperfeiçoar todo o potencial e minimizar possíveis desvantagens do material (ADRIAZOLA, 2008).

Para avaliação de desempenho de sistemas construtivos em madeira, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) composta por seis partes, estabelece requisitos gerais e específicos para cada um dos sistemas avaliados: estruturais, de pisos, de vedações verticais internas e externas, coberturas e hidrossanitários. Os requisitos devem ser seguidos com o intuito de estabelecer regras para avaliação do desempenho de edificações habitacionais, o que possibilita adequações nos procedimentos de execução, uso e manutenção. Estabelece como desempenho o comportamento em uso de uma edificação e seus sistemas.

3.3 O SISTEMA CONSTRUTIVO *WOOD FRAME*

O sistema construtivo *wood frame* (ou sistema plataforma) é um sistema construtivo que tem como principal matéria-prima a madeira, em geral o *pinus sp.* proveniente de florestas plantadas. É um sistema que pode ser total ou parcialmente industrializado, o que possibilita um controle de qualidade dos elementos e componentes construtivos, com rápida execução em canteiro, alta durabilidade e excelente desempenho estrutural, acústico e térmico. Consiste em painéis estruturados em madeira *pinus sp.* de floresta plantada tratada em autoclave, combinada com diferentes materiais para revestimento interno e externo, com materiais isolantes no seu interior, para proteção de intempéries, contra o fogo e para melhorar o desempenho (MOLINA; CALIL J., 2010).

Mesmo sendo largamente utilizado na construção de habitações, em países como os EUA, Canadá, Japão, Alemanha, Nova Zelândia e Chile, ainda está em fase de implantação no Brasil, por diversos fatores, como os culturais, que implicam em uma baixa aceitação por parte dos usuários, que muitas vezes não conhecem o sistema construtivo *wood frame* e associam a madeira com desempenho inadequado quando utilizada em sistemas construtivos de habitações,

em vista de exemplos de habitações de baixa qualidade executadas em madeira, de forma artesanal, sem projeto e matéria-prima adequados, ou até por imposições de mercado, pelo uso de estruturas predominantemente de concreto (ARAKAKI, 2000).

Nos países do hemisfério norte, assim como na América do Sul, em países como o Chile e a Venezuela, são construídas habitações em *wood frame* com controle de qualidade, com componentes totalmente industrializados, de excelente qualidade, com prazos e custos reduzidos, adaptadas para as condições climáticas, regionais e sociais de cada um destes países, com diferentes soluções construtivas, de fabricação e montagem (BARATA, 2008).

3.3.1 Dimensionamento estrutural

O dimensionamento estrutural dos painéis em *wood frame*, baseia-se nos critérios estabelecidos por diferentes normas internacionais, como a norma americana *Wood frame Construction Manual* (WFCM) 2001 e a norma canadense *Canadian Wood-Frame House Construction* (CMHS) 2014, que também apresentam princípios e procedimentos para concepção, seleção de materiais e construção de habitações, de forma detalhada, as normas europeias *Deutsch Norme* (DIN-1052) 1998 e *European Prestandard* (EUROCODE 5) 1997, que consideram as paredes e pisos com um comportamento de placas ou chapas, sujeitas a ações no seu plano e também perpendiculares a este, que forma simplificada, apresentam o comportamento diafragma, quando sujeitas a esforços horizontais decorrentes da ação do vento na edificação.

Cada uma das normas também considera os diferentes fatores climáticos e regionais, como os fatores sísmicos, de cada uma das regiões onde as normas são aplicadas. No Brasil, além da utilização dos procedimentos indicados na norma americana WFCM (2001), para o dimensionamento de elementos estruturais de madeira, como pilares e vigas, de seções simples ou compostas, pode-se utilizar os critérios e recomendações estabelecidos pela norma brasileira NBR 7190 Projeto de estruturas de madeira (ABNT, 1997). Recentemente foram homologados o documento de avaliação técnica DATec nº20A e a diretriz construtiva NR nº05 Revisão 02, pelo Sistema Nacional de Avaliação Técnica, com especificações e diretrizes para construções em *wood frame* no Brasil.

Com relação a segurança contra incêndio, em comparação com outros materiais, como o aço e o concreto, o *wood frame* apresenta um comportamento satisfatório, garantindo que a edificação atenda ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), que é definido pela norma brasileira NBR 14432 Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de

edificações – Procedimento (ABNT, 2001), como o tempo mínimo de resistência ao fogo, de um elemento construtivo da edificação quando sujeito ao incêndio-padrão, que é por sua vez determinado pelo tipo grupo, ocupação/uso e a divisão, em que se enquadra a edificação analisada, de forma a garantir que a edificação tenha capacidade resistente por um período mínimo de tempo suficiente para garantir a total evacuação dos usuários, preservando a integridade física do ser humano.

3.3.2 Fabricação

O sistema *wood frame* utiliza como matéria-prima principal a madeira do gênero pinus, que é leve (baixa densidade), com estrutura porosa, e de boa trabalhabilidade, proveniente de florestas plantadas e posteriormente tratada em autoclave com preservantes químicos como o arseniato de cobre cromatado (CCA). Isto faz com que os resíduos oriundos dos elementos de madeira tratada com CCA sejam classificados como Classe I – perigoso, conforme a NBR 10004 (ABNT, 2004), e sejam possíveis passivos ambientais.

Os painéis são montados em um processo industrializado, conforme a Figura 1, em fábricas através de linhas de produção controladas, e posteriormente armazenados, até serem transportados para obra.

Figura 1 – Fabricação de painéis em *Wood frame*

Fonte: TECVERDE (2016)

Os quadros estruturais das vedações internas e externas recebem a aplicação de manta de material impermeabilizante em suas bases. Nas faces externas são fixadas placas de OSB ou de compensado, manta impermeável e placas cimentíceas ou *sidings*. Nas faces internas são fixadas placas de OSB ou de compensado, manta impermeável e placas de gesso acartonado. Pode-se ainda aplicar manta de material isolante, como lã de rocha ou de vidro, no interior dos painéis, para melhorar o desempenho térmico e acústico dos painéis que compõe as vedações verticais, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Diferentes materiais utilizados nos painéis de vedação vertical

Fonte: AUTOR, 2016

3.3.3 Montagem

Após a execução do elemento de fundação da edificação, em geral executada em concreto armado, do tipo radier, com sóculos, que são pequenos degraus utilizados para elevar a base dos painéis para maior durabilidade, por impedir o contato com a umidade proveniente do piso por capilaridade, os painéis que compõe as vedações verticais são apoiados e alinhados sobre os sóculos, devidamente impermeabilizados com material betuminoso.

Verifica-se o esquadro e o nível vertical e procede-se com a fixação dos painéis, por meio de parafusos metálicos. São verificadas as medidas das diagonais inferiores e superiores, e caso necessário, são realizados ajustes. As vedações verticais são fixadas aos sóculos da fundação por meio de cantoneiras metálicas ou por barras metálicas (esperas), conforme a Figura 3.

Figura 3 - Montagem dos painéis em obra

Fonte: DATec nº20ª (BRASIL, 2017)

O sistema de cobertura, que pode ter estrutura metálica ou de madeira, treliçada com ligações constituídas por chapas de dentes estampados, que recebe as telhas, é instalado. Se houver mais de um pavimento, as vigas e o piso são instalados com placas de OSB ou compensado e manta isolante. Após a etapa de cobertura, procede-se com a fixação das esquadrias, e a execução das instalações hidráulicas e elétricas, e dos arremates internos e externos.

3.3.4 Elementos construtivos

O tipo de fundação deve ser executado em função do tipo de solo, das características climáticas e das cargas da edificação. No Brasil, em geral são executadas fundações em concreto armado do tipo radier ou do tipo de sapatas corridas, com sóculos e esperas metálicas para fixação dos painéis. Em países com climas mais frios, são executadas fundações que isolam o piso da edificação do solo, com uma altura de pelo menos 60 cm, com estruturas de paredes subterrâneas, conhecidas como *basement wall* como mostra a Figura 5.

Figura 4 – Detalhe de uma fundação do tipo *basement wall*

Fonte: CWFHC (CWC, 2016)

Este tipo de fundação, poderia ser utilizado no Brasil em regiões de clima quente e úmido, como a região norte, para melhorar o desempenho térmico da edificação, por meio de ventilação.

O piso do primeiro pavimento é executado, em geral, de forma tradicional, com execução de contrapiso e instalação do revestimento sobre o mesmo, que pode ser cerâmico ou de outros materiais.

Para edificações com mais de um pavimento, os pavimentos superiores são compostos por uma estrutura de vigas de madeira com seções retangulares o do tipo I, que recebem decks de madeira, com chapas OSB. Sobre os decks, são instalados revestimentos, que podem ser de diferentes materiais, com manta isolante intermediária, de modo que a chapa OSB atue como um contrapiso.

Nas áreas úmidas da edificação são utilizadas placas cimentíceas sobre o contrapiso, revestidas com material isolante, com tratamento nas juntas, permitindo assim a instalação de piso frio sobre o contrapiso, com argamassa do tipo colante.

As vedações verticais internas e externas são estruturadas com painéis de madeira, colocados de forma consonante com as placas de OSB, com juntas tratadas, que atuam no contraventamento da estrutura. As ligações dos elementos estruturais são do tipo pregadas, utilizando-se elementos metálicos resistentes a corrosão, para garantir a durabilidade do sistema estrutural.

A estrutura da edificação em *wood frame* é hiperestática, com grande capacidade resistente a esforços decorrentes da ação do vento, e também ótimo comportamento estrutural quando a edificação recebe ações decorrentes de sismos (MOLINA, 2010).

As instalações hidráulicas e elétricas são semelhantes as edificações convencionais. Possuem a vantagem de serem embutidas no interior dos painéis que compõe as vedações verticais, nos vãos internos as peças estruturais de madeira que compõem os montantes dos painéis.

O revestimento interno pode ser composto por placas de gesso acartonado, com pintura acrílica ou revestidas com placas cerâmicas. Pode também ser composto por placas cimentícias com selante e pintura acrílica. O revestimento externo, pode ser feito por meio de *sidings* de diferentes materiais, como aço, PVC e madeira, ou por meio de placas cimentícias e até argamassa armada.

A cobertura da edificação pode ter diferentes tipos de estruturas. A Figura 6 ilustra os componentes de um sistema de cobertura de uma edificação em *wood frame*.

Figura 5 – Componentes do sistema de cobertura de uma edificação em *wood frame*

Fonte: WFCM (AWC, 2015)

Em geral são utilizadas estruturas treliçadas metálicas ou de madeira, com ligações por meio de chapas de dentes estampados, que confere agilidade e menor prazo de execução da cobertura, podendo-se assim executar as etapas posteriores da obra sem interferência de intempéries.

As telhas são instaladas sobre ripas apoiadas sobre as treliças, caso sejam do tipo cerâmica, ou instaladas sobre um deck de OSB e manta isolante, caso sejam do tipo *shingle*.

3.3.5 Exemplos de conjuntos habitacionais em *Wood Frame* no Brasil

Poucos são os exemplos do uso do sistema construtivo *wood frame* no Brasil. Os dois exemplos a seguir, brevemente descritos, demonstram algumas das características positivas do uso da madeira como material de construção, que vão desde as econômicas, com a redução de custos diretos e prazos executivos até as vantagens ambientais, como a redução de resíduos e uso de matéria-prima com menor impacto ambiental. Ambos os exemplos foram realizados pela construtora Tecverde, com sede em Curitiba – PR, especializada na construção de habitações com uso do sistema *wood frame*, um sistema estruturado em painéis de madeira reflorestada tratada, que compõe painéis (paredes, pisos, telhados) e podem ser combinados e/ou revestidos com outros materiais, para melhorar o desempenho térmico e acústico, e é amplamente utilizado na Europa e nos EUA, ainda com pouco uso no Brasil.

O conjunto de casas Residencial Aragano, situado no município de Pelotas – RS, conta com 280 unidades destinadas a famílias com renda mensal de até R\$ 1.600,00 (faixa 1 do PMCMV). Entre as habitações construídas, há 270 sobrados e dez casas térreas, todas com 45 m² de área. Foram as primeiras habitações construídas do PMCMV com sistema construtivo *wood frame*.

A montagem das casas se deu por meio de uma base em concreto sobre fundação simples (radier). Em seguida, instalação de montantes para aplicação das chapas com uso de parabolts (chumbadores). Também foi aplicada membrana asfáltica impermeabilizante entre os montantes e a fundação.

Os montantes foram fixados com pregos e, para finalizar a montagem, os painéis de fechamento se unem à estrutura por meio de parafusos de rosca. A parede externa é composta por chapas cimentícias. As paredes internas são constituídas de chapa de OSB e gesso acartonado.

Um estudo comparativo de custos elaborado em 20015 pela construtora Tecverde indica que a mão de obra para executar todas as etapas da construção de uma casa de alvenaria sairia por R\$ 12.200,00 enquanto que na execução de uma residência em *wood frame* o custo com a mão-de-obra foi de R\$ 6.500,00. Com relação aos custos com materiais, os valores ficaram em R\$18.000,00 para uma casa convencional e de R\$ 19.000,00 para o modelo pré-fabricado em *wood frame*. No total, com base neste comparativo, uma habitação em alvenaria sairia por R\$

30.700,00, e uma habitação em *wood frame* R\$ 26.000,00. Na Figura 6 temos uma habitação em *wood frame* em fase de construção (A) e quando foi entregue (B).

Figura 6 – (A) Residencial Aragano em fase construção. (B) Residencial Aragano concluído

Fonte: TECVERDE

O conjunto de casas Residencial Nilo, localizado no município de Curitiba – PR, conta com 66 casas entregues. O método construtivo empregado, o *wood frame* permitiu que uma residência, sem a cobertura, fosse edificada em aproximadamente três horas. Disso decorre que a construção do condomínio durou, em termos executivos, cerca de metade do prazo normal para uma obra convencional do mesmo porte, além de ter redução de 75% da demanda por mão de obra e de gerar apenas 25% dos resíduos de um canteiro comum. Na Figura 7 temos a fase de construção (A) e a fase final (B).

Figura 7 – (A) Residencial Nilo em fase de construção. (B) Residencial Nilo concluído

Fonte: Cohab Curitiba - PR

Vale ressaltar que o sistema construtivo “tecnologia sustentável a seco”, foi homologada pela CAIXA e o Ministério das Cidades. Ela permite que as paredes sejam montadas com painéis de madeira tratada industrialmente com objetivo de garantir a proteção contra agentes

biodeterioradores. Sobre a estrutura, foi instalado isolamento térmico e acústico e fixadas chapas de cimento na face externa. No interior das paredes, o acabamento é feito em gesso. As casas têm garantia de dez anos dada pela construtora e estimativa média de durabilidade de 50 anos.

3.4 MADEIRA TRATADA

O tratamento da madeira tem por objetivo conferir a mesma durabilidade e resistência que naturalmente ela não teria. Para atingir este objetivo são empregados produtos químicos que conferem as características necessárias para que a madeira apresente resistência frente aos agentes de deterioração e organismos xilófagos ao qual estará exposta.

Em relação à preservação é imprescindível à escolha da espécie da madeira, com base nas propriedades de durabilidade natural e tratabilidade, a definição do risco biológico a que a madeira será submetida (classe de deterioração), e a adoção do método de tratamento e produto preservativo em função do risco biológico, visando ao aumento da durabilidade da madeira.

A norma NBR 16143 (ABNT, 2013) estabelece seis categorias baseadas nas condições de exposição ou uso da madeira, na expectativa de desempenho do componente e nos possíveis agentes biodeterioradores presentes, conforme o Quadro 1 abaixo.

Quadro 1 – Categorias de uso da madeira

Categoria de uso	Condições de uso
1	Interior de construções, fora de contato com o solo, fundações ou alvenaria, protegidas das intempéries, das fontes internas de umidade e locais livres do acesso de cupins subterrâneos ou arborícolas
2	Interior de construções em contato com a alvenaria, sem contato com o solo ou fundações, protegidas das intempéries e das fontes internas de umidade
3	Interior de construções, fora de contato com o solo e protegidas das intempéries, que podem, ocasionalmente, ser expostas a fontes de umidade
4	Uso exterior, fora de contato com o solo e sujeitas às intempéries

Fonte: Adaptado da Tabela 1 da norma NBR 16143 (ABNT, 2013)

A norma NBR 16143 (ABNT, 2013) indica que para paredes (painéis de vedação vertical) em madeira as categorias de uso provável são a 2, a 3 e a 4, descritas no quadro anterior.

Os preservantes mais utilizados são os hidrossolúveis constituídos de sais metálicos e flúor, que incluem na sua formulação várias substâncias químicas como arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu), zinco (Zn) e flúor (F). O principal preservante utilizado no tratamento de madeira no Brasil é o tratamento a base de Arseniato de Cobre Cromatado (CCA).

Considerando o grande volume de madeira tratada gerado, prevê-se que ao longo dos anos haverá um aumento significativo também na quantidade de resíduos provenientes desse processo.

O Brasil é o maior consumidor de madeira tratada da América Latina, segundo a Associação Brasileira de Preservadores de Madeira (ABPM) com aproximadamente 4.882.541 m³ no ano de 2015, sendo a maior parte tratada com sais de CCA, proveniente de 93,5% de florestas plantadas de eucaliptos e 6,5% de florestas plantadas de *pinus*.

Alguns países como o Japão, a Alemanha, a Indonésia, a Suécia e os Estados Unidos, impõem restrições parciais ou totais ao uso do CCA devido à perda dos componentes ao longo do tempo, por lixiviação ou volatilização, o que pode trazer riscos de contaminação ao ser humano e ao meio ambiente (CSIRO, 2011).

Nos estados Unidos, a Environmental Protection Agency (EPA) considera o uso da madeira tratada como segura, mas desde o ano de 2003, em acordo com as indústrias do ramo, a produção de madeira tratada com CCA, para uso domiciliar em deques, mesas de piquenique, jardinagem, paisagismo, cercas residenciais, pátios e passarelas, foi encerrada devido ao alto risco de contato com o ser humano (EPA, 2011).

Em relação ao resíduo oriundo da madeira tratada, há diferentes considerações quanto a sua classificação. Alguns países europeus consideram o resíduo como perigoso e sua destinação segue legislação rigorosa. No Brasil, tanto o uso quanto o descarte da madeira tratada com CCA não apresentam a devida significância, pois de acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), na resolução 307 de 2002, não há distinção entre madeira natural e madeira tratada. De acordo com a norma NBR 10004 (ABNT, 2004) o procedimento correto à disposição final dos resíduos de madeira tratada, devem ser aterros industriais legalizados, Classe I – perigoso, não devendo ser reutilizado na fabricação de produtos destinados à queima (carvão e briquetes), combustíveis e não devem ser descartados inadequadamente. Uma alternativa seria a incorporação do resíduo de madeira tratada junto a resinas para a confecção de componentes reciclados, como proposto por Bertolini, 2011.

3.5 SEGURANÇA CONTRA INCÊNDIO DE ELEMENTOS DE MADEIRA

A segurança contra incêndio é um critério importante para a escolha do material estrutural. A combustibilidade da madeira é uma das razões de muitas regulamentações de edificações e normas restringirem a utilização da madeira como elemento estrutural.

O conhecimento do comportamento da estrutura e dos ocupantes de edificações durante a exposição ao fogo é uma importante condição para o desenvolvimento de estratégias para garantir a segurança contra incêndio.

A norma brasileira NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento (ABNT, 2001) estabelece as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram os edifícios para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso estrutural da edificação. Para os elementos de compartimentação, devem ser atendidos requisitos de estanqueidade e isolamento por um tempo suficiente para permitir a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, a segurança das operações de combate ao incêndio e a minimização de possíveis danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública.

Segundo a Instrução Técnica nº 02 de 2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo a prevenção contra incêndio é um dos tópicos abordados mais importantes na avaliação e planejamento da proteção de uma coletividade, expressando tanto a educação pública como a correta instalação de medidas de proteção contra incêndio em uma edificação. Os objetivos da prevenção são proteger a vida dos ocupantes das edificações e áreas de risco, em caso de incêndio, dificultar a propagação do incêndio, reduzindo danos ao meio ambiente e ao patrimônio, proporcionar meios de controle e extinção do incêndio, dar condições de acesso para as operações do Corpo de Bombeiros e proporcionar a continuidade dos serviços nas edificações e áreas de risco. Esses objetivos são alcançados através de diferentes medidas, dentre elas pelo controle da natureza e da quantidade dos materiais combustíveis constituintes e contidos na edificação, dimensionamento da compartimentação interna, da resistência ao fogo de seus elementos e do distanciamento entre edificações e dimensionamento da proteção e da resistência ao fogo da estrutura da edificação.

A Instrução Técnica nº 08 de 2018 do Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo tem como objetivo estabelecer as condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação que integram as edificações, quanto aos Tempos Requeridos de Resistência ao Fogo (TRRF), que é o tempo mínimo de resistência ao fogo de um elemento construtivo quando sujeito ao incêndio-padrão, para que, em situação de incêndio, seja evitado o colapso

estrutural por tempo suficiente para possibilitar a saída segura das pessoas e o acesso para as operações do Corpo de Bombeiros, atendendo ao previsto no Regulamento de segurança contra incêndio das edificações e áreas de risco do Estado de São Paulo. Quanto aos materiais de revestimento contra fogo a escolha, o dimensionamento e a aplicação de materiais de revestimento contra fogo são de responsabilidade dos responsáveis técnicos, sendo as propriedades térmicas e o desempenho dos materiais de revestimento contra fogo quanto à aderência, combustibilidade, fissuras, toxidade, erosão, corrosão, deflexão, impacto, compressão, densidade e outras propriedades necessárias para garantir o desempenho e durabilidade dos materiais, devem ser determinadas por ensaios realizados em laboratório nacional ou estrangeiro reconhecido internacionalmente, de acordo com norma técnica nacional ou, na ausência desta, de acordo com norma estrangeira reconhecida internacionalmente. As edificações de uso residencial, sem subsolo e com altura h menor que 6 metros possuem Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) igual a 30 minutos.

A autora Gisele C. A. Martins em seu trabalho feito em 2017 realizou ensaios em elementos estruturais em grande escala tendo como finalidade comparar o isolamento térmico de dois tipos de revestimentos utilizados em painéis de madeira confeccionados com o sistema estrutural *wood frame*. Realizou duas séries de ensaios, sendo no primeiro ensaio o revestimento da face exposta ao fogo preparado com duas camadas de gesso do tipo padrão (SG), e no segundo ensaio o revestimento foi composto de duas camadas de gesso do tipo retardante ao fogo (RF).

Segundo a norma NBR 14432 (ABNT, 2001) para ocupação residencial classe P2 (quando a edificação possui altura de até 12 m), o tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) é de 30 minutos. Com a utilização de placas de gesso padrão foi atingido o tempo de 49 minutos, enquanto com placas de gesso retardantes ao fogo foi alcançado o tempo de 73 minutos.

Ambos os painéis de vedação em *wood frame* atenderam aos requisitos da norma NBR 5628 (ABNT, 2001) em relação aos requisitos de resistência mecânica, estanqueidade e isolamento térmico. Entretanto, a utilização de placas de gesso retardantes ao fogo aumenta o tempo de resistência ao fogo dos elementos em 24 minutos quando comparado com a composição de placas de gesso do tipo padrão.

3.6 NBR 15220: DESEMPENHO TÉRMICO DE HABITAÇÕES (ABNT, 2005)

A norma brasileira NBR 15220: Desempenho térmico de edificações (ABNT, 2005) apresenta-se dividida em 5 partes. A parte 1 apresenta a definição (e unidades) das grandezas relacionadas às características térmicas dos materiais, elementos e componentes construtivos, às características térmicas do ambiente e às grandezas do clima do ambiente e da fisiologia humana relacionadas ao condicionamento térmico de edificações. Das definições apresentadas é possível destacar:

1. Resistência térmica total (R_T) – somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais internas e externas [$(m^2 \cdot K)/W$];
2. Transmitância térmica (U) – inverso da resistência térmica total [$W/(m^2 \cdot K)$];
3. Capacidade térmica (C) – quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema [J/K];
4. Capacidade térmica de componentes (C_T) – quociente da capacidade térmica de um componente pela sua área [$J/(m^2 \cdot K)$];
5. Absortância à radiação solar (α) – quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre esta mesma superfície;
6. Conforto térmico – satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente.

A norma também apresenta o zoneamento bioclimático brasileiro, composto por 8 zonas bioclimáticas, onde cada zona é definida pelas características da região geográfica e dos elementos climáticos que interferem nas relações entre o ambiente construído e conforto humano. O anexo A, da parte 3 da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) traz a relação de 330 cidades cujos climas foram classificados. A Figura 8 indica as 8 diferentes zonas do território brasileiro.

Figura 8 – Zoneamento bioclimático brasileiro

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

A norma indica os parâmetros e condições de contorno das habitações unifamiliares (tamanho e proteção das aberturas para ventilação, vedações externas e tipo de cobertura, e estratégias de condicionamento térmico passivo) e estabelece um conjunto de recomendações e estratégias construtivas, com diretrizes, para cada uma das 8 zonas bioclimáticas brasileiras.

3.7 NBR 15575: EDIFICAÇÕES HABITACIONAIS – DESEMPENHO (ABNT, 2013)

A norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013), um marco da construção civil brasileira, tem como foco atender aos requisitos dos usuários, referentes aos sistemas que constituem as edificações habitacionais (sistemas estruturais, sistemas de pisos, sistemas de vedações verticais internas e externas, sistemas de coberturas e sistemas hidrossanitários). Ela é dividida em 6 partes. A parte 1 apresenta os requisitos gerais, a parte 2 os sistemas estruturais, a parte 3

os sistemas de pisos, a parte 4 os sistemas de vedações verticais internas e externas, a parte 5 os sistemas de cobertura e a parte 6 os sistemas hidrossanitários.

O desempenho é determinado através de requisitos, critérios e métodos de avaliação (com exigências qualitativas e quantitativas), de modo à permitir o conhecimento do atendimento, ou não atendimento, de cada um dos sistemas avaliados.

De forma geral, os requisitos dos usuários das edificações habitacionais são listados e expressos pelos fatores:

1. Segurança – requisitos que visam o atendimento da segurança estrutural da edificação, da segurança contra o fogo e ao tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF) em situação de incêndio e da segurança no uso e na operação;

2. Habitabilidade – requisitos que visam o atendimento da estanqueidade das vedações verticais, horizontais e coberturas, do desempenho térmico dos ambientes com foco nos de maior ocupação como os dormitórios e salas, do desempenho acústico em relação aos ruídos externos e aos ruídos internos entre cômodos adajacentes, do desempenho lumínico, da saúde higiene e qualidade do ar, da funcionalidade e acessibilidade, do conforto tátil e antropodinâmico dos usuários;

3. Sustentabilidade – requisitos que buscam o atendimento da durabilidade da edificação, de sua manutenibilidade e do impacto ambiental.

Com relação ao desempenho térmico, a norma NBR 15575 apresenta na Parte 1 - Requisitos gerais, o procedimento 1 de avaliação de desempenho térmico (procedimento simplificado), e o procedimento 2 de avaliação de desempenho térmico por medição, sendo este o adotado para esse trabalho, onde foram feitas medidas *in loco* conforme as instruções anexas a norma.

A Parte 4 – Sistemas de vedações verticais internas e externas traz os requisitos para avaliação do desempenho termoacústico das vedações verticais externas e a parte 5 – Sistemas de coberturas, traz os requisitos para avaliação do desempenho térmico das coberturas.

3.7.1 Desempenho térmico

O procedimento simplificado para avaliação do desempenho térmico da NBR 15575 (ABNT, 2013) está descrito nas partes 1, 4 e 5 da norma. Ele considera para a avaliação à envoltória composta pelas vedações verticais exteriores e a cobertura, além das aberturas para ventilação dos ambientes de longa permanência (salas e dormitórios).

Como relação à área mínima de ventilação em quartos (dormitórios) e salas de estar, ela deve atender a legislação específica do local da obra, e quando não houver requisitos específicos, devem cumprir os requisitos estabelecidos pela Tabela 1 (tabela 15 da NBR 15575: Parte 4). A área A, expressa em porcentagem, é definida pelo quociente da área de aberturas para ventilação A_A sobre a área de piso A_P .

Tabela 1 - Área de abertura mínima de ventilação

Nível de desempenho	Aberturas para ventilação (A)
	Zona 4
Mínimo	$A \geq 7\%$ da área de piso do cômodo avaliado
NOTA: As áreas de ventilação devem ser passíveis de serem vedadas durante o período de frio	

Fonte: Adaptada da Parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

A adequação das vedações verticais externas é definida, conforme a classificação da cidade onde se localiza a edificação, para o zoneamento bioclimático brasileiro, composto por 8 zonas bioclimáticas (descritas anteriormente), pelos valores máximos de transmitância térmica (U), definidos na Tabela 2, e pelos valores mínimos admissíveis de capacidade térmica (C_T), dados na Tabela 3.

Tabela 2 - Valores máximos admissíveis de transmitância térmica (C_T)

Transmitância térmica (U)	
W/m ² *K	
Zona 4	
$\alpha^1 \leq 0,6$	$\alpha^1 \geq 0,6$
$U \leq 3,7$	$U \geq 2,5$
¹ α é absorvância à radiação solar da superfície externa da vedação vertical	

Fonte: Adaptada da Parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

Tabela 3 - Valores mínimos admissíveis para capacidade térmica (C_T)

Capacidade térmica (C_T)
$\text{kJ/m}^2 \cdot \text{K}$
Zona 4
$C_T \geq 130$

Fonte: Adaptada da Parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

Com relação às coberturas, estas devem apresentar valores de transmitância térmica (U) e absorptância a radiação solar da superfície externa (α) de forma que estes parâmetros atribuam um desempenho térmico adequado para cada uma das oito zonas bioclimáticas analisadas, conforme indicado na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros para avaliação do desempenho térmico de coberturas

Transmitância térmica (U)	
$\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$	
Zona 4	
$\alpha^1 \leq 0,6$	$\alpha^1 \geq 0,6$
$U \leq 2,3$	$U \geq 1,5$

¹ α é a absorptância à radiação solar da superfície externa da cobertura

NOTA: O fator de correção da transmitância (FT) é estabelecido na NBR 15220-3

Fonte: Adaptada da Parte 5 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

O método de simulação computacional conforme a NBR 15575 (ABNT, 2013), devem ser utilizados como referência, para a cidade onde se localiza a habitação, os dados das tabelas A1, A2 e A3, com os dados de algumas das cidades brasileiras, dos dias típicos de verão e inverno, e caso não haja disponibilidade de dados para a cidade onde se localiza a habitação, deve-se utilizar dados climáticos de cidade com características equivalentes, pertencente a mesma zona bioclimática do território brasileiro.

A norma NBR 15575 (ABNT, 2013) recomenda o uso do programa *EnergyPlus*, porém indica que outros programas também podem ser utilizados, desde que eles sejam validados pela norma ASHRAE Standard 140.

Com relação à geometria do modelo utilizado nas simulações computacionais, deve-se considerar a habitação como um todo, onde cada ambiente compõe uma zona térmica, e os dados dos materiais devem ser obtidos por meio de ensaios normalizados, ou utilizar os dados de referência na norma NBR 15220, caso não seja possível obter os dados junto aos fabricantes dos materiais.

Os requisitos de desempenho no verão consideram como valor máximo diário da temperatura do ar interior ($T_{i,máx}$) dos ambientes de longa permanência (salas e quartos), sem considerar fontes de geração interna de calor (ocupantes, equipamentos e lâmpadas), deve ser igual ou menor ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior ($T_{e,máx}$), considerando como M o desempenho mínimo aceitável, conforme a Tabela 5.

Tabela 5 - Requisitos de desempenho no verão

Nível de desempenho	Critério
	Zona 4
M	$T_{i,máx} \leq T_{e,máx}$

$T_{i,máx}$. é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C

$T_{e,máx}$. é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C

NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a NBR 15220-3

Fonte: NBR 15575: Parte 1 (ABNT, 2013)

Os requisitos de desempenho no inverno consideram como valor mínimo diário da temperatura do ar interior ($T_{i,mín}$) dos ambientes de longa permanência (salas e quartos), sem considerar fontes de geração interna de calor (ocupantes, equipamentos e lâmpadas), deve ser igual ao valor mínimo diário da temperatura do ar exterior ($T_{e,mín}$) acrescido de 3°C, considerando como M o desempenho mínimo aceitável, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Requisitos de desempenho no inverno

Nível de desempenho	Critério
	Zona 4
M	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 3 \text{ }^{\circ}\text{C})$

$T_{i,mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em °C
 $T_{e,mín.}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em °C
 NOTA: Zonas bioclimáticas de acordo com a NBR 15220-3

Fonte: NBR 15575: Parte 1 (ABNT, 2013)

Para edificações em fase de projeto, a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelece a que avaliação do desempenho térmico deve ser feita considerando um dia típico de projeto de verão e de inverno, considerando, no caso de conjunto habitacional de edificações térreas, a unidade com maior número de vedações verticais externas expostas (unidade representativa para avaliação).

A unidade habitacional representativa deverá passar por simulação computacional para avaliação do desempenho térmico considerando todos os ambientes, levando em consideração as possíveis trocas térmicas entre os mesmos. A orientação da edificação deve ser a mesma da implantação e a unidade habitacional representativa deve ser a que apresentar condição mais crítica em relação ao ponto de vista térmico.

Para a condição crítica, no verão as janelas dos quartos e salas devem estar voltadas para o oeste com a outra vedação vertical exposta voltada para o norte. No inverno, as janelas dos quartos e salas devem estar voltadas para o sul com a outra vedação vertical exposta voltada para o leste. Deve-se considerar que as vedações verticais expostas e as janelas estejam desobstruídas e os possíveis dispositivos de sombreamento devem ser considerados na simulação.

Com relação à taxa de ventilação deve-se adotar uma taxa de uma renovação do ar do ambiente, e da cobertura, por hora. A absorvância a radiação solar deve seguir o valor adotado em projeto, para as vedações verticais externas e para a cobertura.

No caso do não atendimento das condições mínimas de desempenho para o verão, pode-se considerar que ocorram alterações na:

- Ventilação - considerar uma taxa de cinco renovações do ar do ambiente por hora e as janelas sem sombreamento;

- Sombreamento – taxa de renovação de uma renovação do ar do ambiente por hora e adoção de proteção solar externa ou interna que reduza em pelo menos 50% a radiação solar das janelas;
- Ventilação e sombreamento - considerar uma taxa de cinco renovações do ar do ambiente por hora e adoção de proteção solar externa ou interna que reduza em pelo menos 50% a radiação solar das janelas.

3.8 ANSI/ASHRAE 55-2013

A norma americana ANSI/ASHRAE 55-2013 estabelece condições onde um determinado grupo de ocupantes de uma edificação irá avaliar se o ambiente é termicamente aceitável. A abordagem focaliza em características de pesquisas feitas em edifícios reais, ou seja, aqueles em uso cujo as condições térmicas não são controladas pelos pesquisadores.

Os dados experimentais das pesquisas feitas em diversos edifícios de diferentes continentes e zonas climáticas foram padronizados de acordo com o sistema de condicionamento de ar do edifício analisado, sendo naturalmente ventilados (NV) ou artificialmente refrigerados (HVAC) e também com a estação do ano da realização do experimento, sendo verão ou inverno.

Com um total de 22 grupos de pesquisa, a base de dados que gerou a norma americana ANSI/ASHRAE 55-2013, envolveu um amplo processo para criação do método, coleta, interpretação e análise dos dados, para se obter uma classificação dos edifícios analisados por meio das pesquisas experimentais.

A norma americana ANSI/ASHRAE 55-2013 apresenta um índice baseado na teoria adaptativa de conforto térmico, com as vantagens de possibilitar o controle da abertura de janelas por parte dos usuários das edificações, e com isso, poder aumentar os limites adotados para as velocidades internas do ar. Ela se baseia na hipótese de um ambiente termicamente uniforme com um possível controle deste ambiente aos usuários, e estabelece que, desta forma, os usuários irão tolerar maiores flutuações nas condições ambientais. Assim, os projetistas têm maiores condições de estabelecer quando o condicionamento artificial é requerido num edifício e, quando é possível incorporar a ventilação natural, para se proporcionar o conforto térmico.

Os dados de entrada do índice proposto por esta norma são a média mensal das temperaturas externas (média aritmética da média mensal das máximas e da média mensal das mínimas) e a temperatura operativa (média aritmética entre o a temperatura interna do ar e a temperatura radiante).

A Figura 9 resume o índice obtido e traz as zonas de conforto, onde 90% ou 80% dos usuários estariam satisfeitos, dependendo dos limites adotados para análise.

Figura 9 – Índice de conforto proposto pela norma americana ANSI/ASHRAE 55-2013

Fonte: ANSI/ASHRAE 55-2013

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 ESTRUTURA METODOLÓGICA

A estrutura metodológica para este trabalho de pesquisa foi experimental, sendo dividida em três etapas e 4 subetapas.

A Figura 10 apresenta a estrutura metodológica.

Figura 10 – Estrutura metodológica

4.2 OBJETO DE ESTUDO

A avaliação de desempenho dos painéis de vedação vertical em *wood frame* foi realizada em uma habitação unifamiliar construída através do sistema *wood frame*, objeto de estudo deste trabalho, localizada na cidade de São Carlos-SP.

A Figura 11 mostra a habitação em fase de construção, com parte dos painéis verticais montados, já solidarizados pelas camadas de revestimento interno e externo com placas de compensado.

Figura 11 – Habitação em construção

Fonte: STAMATO, 2016

A Figura 12 apresenta a habitação concluída e já habitada, com todos os painéis de vedação vertical concluídos.

Figura 12 – Habitação concluída

Fonte: AUTOR, 2017

A cidade de São Carlos-SP está localizada a 22°01' de latitude Sul, 47°53' de longitude Oeste e altitude média de 856m, sendo a cidade com maior altitude em relação aos municípios vizinhos, o que faz com que ela seja exposta a ventos fortes, principalmente no período noturno e tenha uma grande amplitude térmica nos períodos de outono e inverno.

Conforme as Normais Climatológicas observadas entre 1960 e 1990 (BRASIL, 1992), durante oito meses do ano, entre abril e novembro, as médias mensais de umidade relativa em São Carlos permanecem abaixo de 70% e as amplitudes médias mensais de temperaturas, ou seja, as diferenças entre as médias de temperaturas máximas e as médias de temperaturas mínimas variam entre 10 e 11,8 °C.

De acordo com o zoneamento bioclimático brasileiro estabelecido na norma NBR 15220 (ABNT, 2005), a cidade de São Carlos está localizada na Zona Bioclimática 4 (Figura 10a). Os dados climáticos de São Carlos foram plotados sobre a Carta Bioclimática adotada no referido projeto, como se pode observar na Figura 13.

Figura 13 – (A) Zona bioclimática 4. (B) Carta bioclimática da zona 4

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

4.3 PAINÉIS DE VEDAÇÃO VERTICAL EM *WOOD FRAME*

Os painéis que compõe os sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE) do objeto de estudo são compostos por diferentes camadas, conforme mostra Figura 14.

Figura 14 – Vedação vertical externa em *wood frame* e seus componentes

- 1 - Vedação Vertical Externa (VVE) em *wood frame*
- 2 - Placa de gesso acartonado
- 3 - Placa de compensado
- 4 - Montantes de madeira *pinus sp.*
- 5 - Lã de rocha
- 6 - Placa de compensado
- 7 - Manta hidrófuga
- 8 - Manta de subcobertura
- 9 - Ripas de madeira *pinus sp.*

Fonte: AUTOR, 2017

A estrutura é composta por montantes de madeira *pinus sp.* com seção de 38x90mm, tratada em autoclave com arseniato de cobre cromatado (CCA), revestida em ambas as faces por chapas de compensado com 12mm de espessura, e revestida internamente por placas de gesso acartonado com 12,5mm de espessura. Os painéis contam com uma camada de 50mm de lã de rocha para isolamento térmico e acústico. Externamente, são revestidas com manta hidrófuga e ripas de *pinus sp.* com 22mm de espessura.

As vedações verticais internas de áreas secas são revestidas em ambas as faces por placas de gesso acartonado. As vedações verticais de áreas molhadas contam com revestimento cerâmico.

4.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO ACÚSTICO

As normas brasileiras NBR 10151 (ABNT, 2000) e NBR 10152 (1987), estabelecem, com base no tipo de área analisado (áreas rurais, urbanas, mistas e industriais), critérios de avaliação para ambientes externos para avaliação de ruído e níveis de ruído para mensuração do conforto acústico dos usuários das edificações analisadas.

Os sistemas leves de vedações verticais, como os empregados nos sistemas construtivos *wood frame* e *steel frame*, que podem ser pré-fabricados e racionalizados, permitindo uma execução em obra mais eficiente e com menores prazos, em geral, possuem espessura total menor do que as das vedações verticais médias e pesadas, como as alvenarias, mais tradicionais nas edificações brasileiras. Uma vedação vertical leve em *wood frame*, possui diferentes materiais, que podem variar com os requisitos da área em que ela for empregada, como em áreas secas e áreas molhadas, onde são utilizadas diferentes placas e camadas para o revestimento das vedações verticais.

A avaliação do desempenho acústico foi feita através de ensaios de campo, com diferentes frequências de fonte sonora, agudas, médias e graves (de 100 a 3150 Hz), para medição do isolamento ao ruído aéreo, conforme método de campo descrito na parte 5 da norma internacional ISO 140 (substituída pela parte 1 da norma internacional ISO 16283) indicado na parte 4 da norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013), que como critério a diferença padronizada de nível ponderada, promovida pela vedação vertical externa. Para efeito de comparação também foi utilizado o ruído branco¹. A captação do ruído foi feita utilizando-se dois decibelímetros digitais modelo MSL-1352 C da marca MINIPA. A Figura 15 ilustra o procedimento utilizado para avaliação do desempenho acústico.

¹ O ruído branco é o ruído cuja densidade espectral de energia é constante para todas as frequências audíveis.

Figura 15 – Esquema do ensaio realizado em campo pelo método de engenharia para determinação do isolamento sonoro global da vedação externa

Fonte: AUTOR, 2017

Nos ensaios de campo foi utilizada uma fonte emissora monodirecional de ruído com 30W de potência, com 45° em relação ao plano do piso, e a 5 metros da vedação vertical externa (conjunto fachada e cobertura) avaliada, 2 decibelímetros, e um gerador de sinal.

O Quadro 2, adaptado tabela 17 da parte 4 da norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013), apresenta os valores mínimos da diferença padronizada de nível ponderada $D_{2m,nT,w}$, conforme a classe de ruído da habitação avaliada.

Quadro 2 - Valores mínimos da diferença padronizada ponderada da vedação externa de dormitório

Classe de ruído	Localização da habitação	$D_{2m,nT,w}$ (db)
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso	≥ 20
II	Habitação localizada em situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 25
III	Habitação sujeita a ruído intenso	≥ 30

Fonte: Adaptada da parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

O Quadro 3, adaptado do anexo F da parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013) traz recomendações relativas ao nível de desempenho, sendo M um desempenho mínimo, I um desempenho intermediário, e S um desempenho superior, da diferença padronizada de nível ponderada, a 2 metros da vedação vertical externa avaliada.

Quadro 3 - Níveis de desempenho da vedação vertical externa, relativos a diferença padronizada ponderada

Classe de ruído	Localização da habitação	$D_{2m,nT,w}$ (db)	Nível de desempenho
I	Habitação localizada distante de fontes de ruído intenso	≥ 20	M
		≥ 25	I
		≥ 30	S
II	Habitação localizada em situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	≥ 25	M
		≥ 30	I
		≥ 35	S
III	Habitação sujeita a ruído intenso	≥ 30	M
		≥ 35	I
		≥ 40	S

Fonte: Adaptada da parte 4 da NBR 15575 (ABNT, 2013)

A habitação unifamiliar em *wood frame* avaliada se encontra distante de fontes de ruído intenso, se enquadrando na Classe de ruído I. Para um desempenho mínimo (M) da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, deve ser igual ou superior a 20 dB. Para um desempenho intermediário (I) da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, deve ser igual ou superior a 25 dB. Para um desempenho superior (S) da diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, deve ser igual ou superior a 30 dB.

A parte 1 da norma brasileira NBR 15575 (ABNT, 2013) traz requisitos gerais para edificações habitacionais, onde o desempenho acústico é um dos requisitos do usuário, relativo à habitabilidade.

Em relação ao requisito níveis de ruídos permitidos na habitação, o critério é a Diferença Padronizada de Nível Ponderada, $D_{2m,nT,w}$, promovida pela vedação vertical externa (fachada) em *wood frame*.

A Diferença Padronizada de Nível Ponderada, $D_{2m,nT,w}$, é obtida a partir do cálculo da Diferença Padronizada de Nível a 2 m, $D_{ls,2m, nT}$, respectivamente, conforme as equações 1 e 3:

$$D_{nT} = D - 10 \log (T/T_0) \quad [1]$$

Onde,

D é a diferença de nível, em decibéis, dB;

T é o tempo de reverberação da sala de recepção, em segundos;

T_0 é o tempo de reverberação de referência, em edificações, $T_0 = 0,5$ s.

Sendo a diferença de nível, D , obtida da diferença entre os níveis de pressão sonora da fonte, conforme a equação 2:

$$D = L_1 - L_2 \quad [2]$$

Onde,

L_1 é o nível de pressão sonora no local de emissão, em decibéis, dB;

L_2 é o nível de pressão sonora na sala de recepção, em decibéis, dB.

A Diferença Padronizada de Nível a 2 m, $D_{ls,2m, nT}$, é obtida através da equação 3 definida abaixo:

$$D_{ls,2m,nT} = D_{ls,2m} + 10 \log (T/T_0) \quad [3]$$

Onde,

$D_{ls,2m}$ é a diferença de nível a 2 m, em decibéis, dB;

T é o tempo de reverberação da sala de recepção, em segundos;

T_0 é o tempo de reverberação de referência (edificações), $T_0 = 0,5$ s.

Por sua vez, a Diferença de Nível a 2 m, $D_{ls,2m}$, é obtida pela equação 4 definida abaixo:

$$D_{ls,2m} = L_{1,2m} - L_2 \quad [4]$$

Onde,

$L_{1,2m}$ é o resultado da diferença entre o nível de pressão sonora médio do lado de fora, a 2 m da fachada, em decibéis, dB;

L2 é o nível de pressão sonora na sala de recepção, em decibéis, dB.

4.5 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO

A avaliação do desempenho térmico foi feita a partir de medições da temperatura externa do ar e da temperatura interna do ar dos cômodos de maior ocupação, os dormitórios 1 (suíte 1) e 3 (suíte 3), conforme mostra a Figura 16 a seguir.

Figura 16 – Cômodos de maior ocupação da habitação em *wood frame* utilizados na coleta de dados de Temperatura interna do ar

Fonte: AUTOR, 2017

A coleta dos dados das temperaturas externas e internas do ar para avaliação do desempenho térmico da habitação unifamiliar em *wood frame* foi realizada em três² períodos distintos, conforme o Quadro 4 a seguir.

Quadro 4 – Períodos de coleta dos dados de Temperatura interna e externa do ar

Estação do ano	Mês	Ano	Período
Outono	Maio	2017	20 a 29
Inverno	Agosto	2017	01 a 10
Verão	Fevereiro	2018	08 a 17

Fonte: AUTOR, 2018

A avaliação do desempenho térmico da habitação unifamiliar foi feita por meio de medições *in loco* foi feita seguindo o procedimento apresentado no Anexo A da Parte 1 da norma NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013). As medições de temperatura do ar nos dormitórios foram feitas com os sensores a aproximadamente 1,20 m do piso, próximos ao centro dos dormitórios. As medições de temperatura exterior do ar a habitação foram feitas com a colocação do medidor em local sombreado e protegido de calor radiante. A montagem dos equipamentos e sensores foi feita segundo as especificações apresentadas na norma ISO 7726 (ISO, 1998). Utilizou-se na coleta de dados medidores do tipo HOBO, modelo h08.007.15, ilustrado na Figura 17, calibrados para realizarem medições consecutivas em um período de 10 dias com intervalo de 10 minutos entre as medições.

² Foram realizadas medições somente em três períodos por limitações decorrentes da disponibilidade de medidores de temperatura, em vista que havia outras pesquisas em andamento no IAU-USP que também utilizavam os mesmos medidores.

Figura 17 – Medidor HOBO utilizado para a coleta de dados de Temperatura interna e externa do ar

Fonte: AUTOR, 2017

Em relação ao período de medição foram feitas coletas de dados em sequências de dez dias com características semelhantes, e para efeito da avaliação por medição, o dia típico é caracterizado unicamente pelos valores da temperatura externa do ar exterior medidos no local. Desta forma, foi possível obter dados representativos de temperatura do ar de um dia típico de verão e de um dia típico de inverno, na cidade de São Carlos – SP.

5 RESULTADOS

Os resultados parciais desta pesquisa estão organizados em duas frentes:

- 1) Desempenho acústico dos painéis de vedação verticais externos em *wood frame* que compõe a fachada da habitação unifamiliar avaliada;
- 2) Desempenho térmico de ambientes de ocupação permanente do objeto de estudo, uma habitação em *wood frame* na cidade de São Carlos - SP.

5.1 DESEMPENHO ACÚSTICO

Por meio de ensaios de campo, foram obtidos os seguintes resultados de desempenho acústico dos painéis de vedação verticais externos.

Neste trabalho foi utilizado como parâmetro para avaliar o isolamento da vedação vertical externa estudada o valores da Diferença Padronizada de Nível Ponderado, $D_{2m,nT,w}$.

Foram realizados, de acordo com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) os ensaios de isolamento acústico ao ruído aéreo de uma vedação vertical externa (fachada), do objeto de estudo, uma habitação em *wood frame* recém construída e ocupada, localizada em um condomínio de casas na cidade de São Carlos-SP, sendo em um local que pode ser classificado com classe de ruído I, por estar afastado de fontes de ruído intenso de qualquer natureza (aeroportos, estádios, ferrovias, rodovias etc.).

O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos nos ensaios realizados pelo método de engenharia realizado em campo, através do nível de desempenho descrito no quadro 3 deste trabalho (sendo S um desempenho considerado superior) agrupados por frequências de ruído (agudas, médias e graves, de 100 Hz a 3150 Hz) utilizadas nos ensaios.

Quadro 5 – Resumo dos resultados da Diferença Padronizada de Nível para fachadas ($D_{2m,nT}$) e a Diferença Padronizada de Nível Ponderada ($D_{2m,nT,w}$) para fachadas em dB nas medições

D2m,nT (dB)															D2m,nT,w (dB)	
Frequências (Hz)															32,3	
Graves						Médias						Agudas				
100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500		3150
29,3	26,8	30,2	27,2	29,9	30	28,2	30	33,5	29,5	37,4	37,3	39,8	36,3	31,9		33,3

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados obtidos foram satisfatórios, com a diferença padronizada de nível ponderada, $D_{2m,nT,w}$, igual a 32,3 db, valor maior que 30 db, o que corresponde a um nível de desempenho superior (S), com a vedação vertical externa com tipologia em *wood frame*.

5.2 DESEMPENHO TÉRMICO

5.2.1 Períodos de coleta de dados

Os dados de temperatura externa e interna do ar obtidos nos três diferentes períodos, cada um com 10 dias de medições ininterruptas, estão descritos detalhadamente nos itens seguir. Desta forma foi possível obter dados que contemplam a variação térmica anual da cidade de São Carlos – SP. A partir deles foram obtidos os resultados de desempenho térmico dos cômodos de maior ocupação, os dormitórios 1 (suíte 1) e 3 (suíte 3), para os requisitos de desempenho no verão e para os requisitos de desempenho no inverno.

5.2.1.1 Primeiro período de coleta de dados – Maio de 2017

O primeiro período de coleta de dados escolhido foi o do mês de maio de 2017, no período de outono, caracterizado por grandes amplitudes térmicas. Através dos dados de temperatura externa e interna do ar, no período de outono, em maio de 2017, foi possível verificar a amplitude térmica e a diferença entre as temperaturas externas máximas e mínimas

em relação às temperaturas máximas e mínimas no interior da habitação, em dois cômodos de maior ocupação.

A Figura 18 ilustra a amplitude térmica da temperatura do ar medida na parte externa da edificação, para o período de maio de 2017 (outono), correspondente à primeira coleta de dados de temperatura externa e interna do ar.

Figura 18 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de maio de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 19 traz a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 1 (suíte 1) da habitação avaliada, no período de maio de 2017.

Figura 19 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de maio de 2017.

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 20 mostra a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 3 (suíte 3) da habitação avaliada, no período de maio de 2017.

Figura 20 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de maio de 2017.

Fonte: AUTOR, 2017

Como é possível observar na Figura 21 e na Figura 22 referentes ao período³ de 23 a 25 de maio de 2017, as temperaturas do ar no interior da edificação nos dormitórios 1 e 3 (suítes 1 e 3) onde foram realizadas as primeiras medições, foram muito próximas com valores em torno de 23°C, e com uma amplitude pequena, quando comparada a amplitude das medidas de temperatura externas do ar para o mesmo período.

³ Para uma apresentação gráfica mais clara dos resultados obtidos foram utilizados somente os dados de 3 dos 10 dias do primeiro período de medições de temperatura do ar externa e internas.

Figura 21 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 23 a 25 maio de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 22 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 23 a 25 maio de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

A habitação unifamiliar em *wood frame* avaliada atende parcialmente aos requisitos de desempenho térmico da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), segundo o método de simplificado descrito na seção de materiais e métodos deste trabalho.

Possui área de aberturas (A_A) maior que o mínimo exigido de 7%, transmitância térmica (U) abaixo do limite estabelecido de $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, mas não atende ao valor mínimo exigido para a capacidade térmica (C_T) de $130 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, por se tratar de um sistema construtivo leve, com baixa inércia térmica e consequentemente baixa capacidade térmica das vedações verticais externas.

Os resultados mostram que a edificação atende aos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para avaliação do desempenho térmico por meio de medições das temperaturas máximas e mínimas do ar no interior dos ambientes de longa permanência, no caso os dois

dormitórios avaliados na primeira etapa de coletas de dados correspondente ao período de outono, do objeto de estudo.

5.2.1.2 Segundo período de coleta de dados – Agosto de 2017

O segundo período de coleta de dados escolhido foi o do mês de agosto de 2017 no período de inverno, caracterizado por apresentar as temperaturas mínimas anuais na cidade de São Carlos – SP, e desta forma, abranger o dia típico de inverno para a avaliação de desempenho térmico. Através dos dados de temperatura externa e interna do ar, no período de inverno, em agosto de 2017, foi possível verificar a amplitude térmica e a diferença entre as temperaturas externas máximas e mínimas em relação às temperaturas máximas e mínimas no interior da habitação, em dois cômodos de maior ocupação.

A Figura 23 ilustra a amplitude térmica da temperatura do ar medida na parte externa da edificação, para o período de agosto de 2017 (inverno), correspondente à primeira coleta de dados de temperatura externa e interna do ar.

Figura 23 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de agosto de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 24 traz a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 1 (suíte 1) da habitação avaliada, no período de agosto de 2017.

Figura 24 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar na do dormitório 1 (suíte 1), no período de agosto de 2017.

Fonte: AUTOR, 2017

A Figura 25 mostra a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 3 (suíte 3) da habitação avaliada, no período de agosto de 2017.

Figura 25 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de agosto de 2017.

Fonte: AUTOR, 2017

Como é possível observar na Figura 26 e na Figura 27 referentes ao período⁴ de 01 a 03 de agosto de 2017, as temperaturas do ar no interior da edificação nos dormitórios 1 e 3 (suítes 1 e 3) onde foram realizadas as primeiras medições, foram muito próximas com valores em torno de 22°C, e com uma amplitude pequena, quando comparada a amplitude das medidas de temperatura externas do ar para o mesmo período.

⁴ Para uma apresentação gráfica mais clara dos resultados obtidos foram utilizados somente os dados de 3 dos 10 dias do segundo período de medições de temperatura do ar externa e internas.

Figura 26 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 01 a 03 agosto de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

Figura 27 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 01 a 03 agosto de 2017

Fonte: AUTOR, 2017

Os resultados mostram que a edificação atende aos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para avaliação do desempenho térmico por meio de medições das temperaturas máximas e mínimas do ar no interior dos ambientes de longa permanência, no caso os dois dormitórios avaliados na segunda etapa de coleta de dados correspondente ao período de inverno, do objeto de estudo.

5.2.1.3 Terceiro período de coleta de dados – Fevereiro de 2018

O terceiro período de coleta de dados escolhido foi o do mês de fevereiro de 2018 no período de verão, caracterizado por apresentar as temperaturas máximas do ano na cidade de São Carlos – SP, e desta forma, abranger o dia típico de verão para a avaliação de desempenho térmico. Por meio dos dados de temperatura externa e interna do ar, no período de verão, em

fevereiro de 2018, foi possível verificar a amplitude térmica e a diferença entre as temperaturas externas máximas e mínimas em relação às temperaturas máximas e mínimas no interior da habitação, em dois cômodos de maior ocupação.

A Figura 28 ilustra a amplitude térmica da temperatura do ar medida na parte externa da edificação, para o período fevereiro de 2018 (verão), correspondente à terceira coleta de dados de temperatura externa e interna do ar.

Figura 28 - Amplitude térmica da Temperatura do ar externa, no período de fevereiro de 2018

Fonte: AUTOR, 2018

A Figura 29 traz a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 1 (suíte 1) da habitação avaliada, no período de fevereiro de 2018.

Figura 29 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar na do dormitório 1 (suíte 1), no período de fevereiro de 2018.

Fonte: AUTOR, 2018

A Figura 30 mostra a amplitude térmica das medidas da temperatura do ar interna no dormitório 3 (suíte 3) da habitação avaliada, no período de fevereiro de 2018.

Figura 30 – Amplitude térmica da Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de fevereiro de 2018.

Fonte: AUTOR, 2018

Como é possível observar na Figura 31 e na Figura 32 referentes ao período⁵ de 08 a 10 de fevereiro de 2018, as temperaturas do ar no interior da edificação nos dormitórios 1 e 3 (suítes 1 e 3) onde foram realizadas as primeiras medições, foram muito próximas com valores em torno de 25°C, e com uma amplitude pequena, quando comparada a amplitude das medidas de temperatura externas do ar para o mesmo período.

⁵ Para uma apresentação gráfica mais clara dos resultados obtidos foram utilizados somente os dados de 3 dos 10 dias do terceiro período de medições de temperatura do ar externa e internas.

Figura 31 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 1 (suíte 1), no período de 08 a 10 fevereiro de 2018

Fonte: AUTOR, 2018

Figura 32 – Temperatura externa do ar e Temperatura interna do ar do dormitório 3 (suíte 3), no período de 08 a 10 maio de 2018

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados mostram que a edificação atende aos requisitos da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) para avaliação do desempenho térmico por meio de medições das temperaturas máximas e mínimas do ar no interior dos ambientes de longa permanência, no caso os dois dormitórios avaliados na primeira etapa de coletas de dados correspondente ao período de verão, do objeto de estudo.

5.2.2 Desempenho no verão

Com base na análise dos dados de temperatura externa do ar dos 3 períodos de medição, cada um com 10 dias de medições ininterruptas, foi possível obter os dados de temperatura externa do ar correspondentes ao dia típico de verão, que apresenta a maior temperatura externa do ar, $T_{e,máx}$, obtida nas medições deste trabalho. Estes dados correspondem ao dia 09/02/2018,

com temperatura máxima externa do ar de 33,6 °C. Para melhor visualização das diferenças entre as temperaturas externas e internas do ar, foram feitos gráficos para cada um dos dormitórios avaliados (cômodos de maior ocupação).

A Figura 33 mostra a diferença entre a Temperatura Externa do ar e a Temperatura interna do ar no dormitório 1 (suíte 1) para o dia típico de verão encontrado, com $T_{e,máx} = 33,6$ °C.

Figura 33 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 1 para o Dia típico de Verão

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados obtidos para o dormitório 1 (suíte 1) e os requisitos de desempenho no verão estabelecidos na Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) seguem no Quadro 6 a seguir.

Quadro 6 – Critério e desempenho térmico para condições de verão – Dormitório 1

Nível de desempenho	Zona 4	Te,máx (°C)	Ti,máx (°C)	Resultados	
M	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx}$	33,6	28,3	$28,3 < 33,6$	Atende
I	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx} - 2 \text{ °C})$	33,6	28,3	$28,3 < 31,6$	Atende
S	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx} - 4 \text{ °C})$	33,6	28,3	$28,3 < 29,6$	Atende
<p>Ti,máx. é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius. Te,máx. é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior á edificação, em graus Celsius. M é o nível de desempenho mínimo de conforto dos usuários. I é o nível de desempenho intermediário de conforto dos usuários. S é o nível de desempenho superior de conforto dos usuários. Zona bioclimática 4 de acordo com a Parte 3 da norma NBR 15220 (ABNT, 2005).</p>					

Fonte: AUTOR, 2018

O dormitório 1 (suíte 1) apresenta um nível superior (S) de desempenho térmico, atendendo com folga ao critério de desempenho térmico para condições de verão estabelecido pela Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). A diferença algébrica para o dormitório 3 entre Te,máx. e Ti,máx. é igual 5,3 °C.

A Figura 34 apresenta a diferença entre a Temperatura Externa do ar e a Temperatura interna do ar no dormitório 3 (suíte 3) para o dia típico de verão encontrado, com $T_{e,máx} = 33,6$ °C.

Figura 34 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 3 para o Dia Típico de Verão

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados obtidos para o dormitório 3 (suíte 3) e os requisitos de desempenho no verão estabelecidos na Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) seguem no Quadro 7 a seguir.

Quadro 7 – Critério e desempenho térmico para condições de verão – Dormitório 3

Nível de desempenho	Zona 4	Te,máx (°C)	Ti,máx (°C)	Resultados	
M	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx}$	33,6	28,4	$28,4 < 33,6$	Atende
I	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx} - 2 \text{ °C})$	33,6	28,4	$28,4 < 31,6$	Atende
S	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx} - 4 \text{ °C})$	33,6	28,4	$28,4 < 29,6$	Atende
<p>Ti,máx. é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius. Te,máx. é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior á edificação, em graus Celsius. M é o nível de desempenho mínimo de conforto dos usuários. I é o nível de desempenho intermediário de conforto dos usuários. S é o nível de desempenho superior de conforto dos usuários. Zona bioclimática 4 de acordo com a Parte 3 da norma NBR 15220 (ABNT, 2005).</p>					

Fonte: AUTOR, 2018

O dormitório 3 (suíte 3) apresenta um nível superior (S) de desempenho térmico, atendendo com folga ao critério de desempenho térmico para condições de verão estabelecido pela Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). A diferença algébrica para o dormitório 3 entre Te,máx. e Ti,máx. é igual 5,2 °C.

5.2.3 Desempenho no inverno

Através da análise dos dados de temperatura externa do ar dos 3 períodos de medição, cada um com 10 dias de medições ininterruptas, foi possível obter os dados de temperatura externa do ar correspondentes ao dia típico de inverno, que apresenta a menor temperatura externa do ar obtida nas medições deste trabalho. Estes dados correspondem ao dia 06/08/2017, com temperatura mínima externa do ar de 10,6 °C. Para uma melhor visualização das diferenças entre as temperaturas externas e internas do ar foram feitos gráficos para cada um dos dormitórios avaliados.

A Figura 35 mostra a diferença entre a Temperatura Externa do ar e a Temperatura interna do ar no dormitório 1 (suíte 1) para o dia típico de verão encontrado, com $T_{i,mín} = 10,6$ °C.

Figura 35 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 1 para o Dia Típico de Inverno

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados obtidos para o dormitório 1 (suíte 1) e os requisitos de desempenho no inverno estabelecidos na Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) seguem no Quadro 8 a seguir.

Quadro 8 – Critério e desempenho térmico para condições de inverno – Dormitório 1

Nível de desempenho	Zona 4	Ti,mín (°C)	Te,mín (°C)	Resultados	
M	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 3 \text{ } ^\circ\text{C})$	18,7	10,6	$18,7 > 13,6$	Atende
I	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 5 \text{ } ^\circ\text{C})$	18,7	10,6	$18,7 > 15,6$	Atende
S	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 7 \text{ } ^\circ\text{C})$	18,7	10,6	$18,7 > 17,6$	Atende
<p>Ti,mín. é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius. Te,mín. é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior á edificação, em graus Celsius. M é o nível de desempenho mínimo de conforto dos usuários. I é o nível de desempenho intermediário de conforto dos usuários. S é o nível de desempenho superior de conforto dos usuários. Zona bioclimática 4 de acordo com a Parte 3 da norma NBR 15220 (ABNT, 2005).</p>					

Fonte: AUTOR, 2018

O dormitório 1 (suíte 1) apresenta um nível superior (S) de desempenho térmico, atendendo ao critério de desempenho térmico para condições de verão estabelecido pela Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). A diferença algébrica para o dormitório 1 entre $T_{i,mín.}$ e $T_{e,mín.}$ é igual 8,1 °C.

A Figura 36 a seguir mostra a diferença entre a temperatura externa do ar e a temperatura interna do ar no dormitório 3 (suíte 3) para o dia típico de verão, com $T_{e,mín} = 10,6 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Figura 36 – Temperatura Externa do ar e Temperatura Interna do ar do Dormitório 3 para o Dia Típico de Inverno

Fonte: AUTOR, 2018

Os resultados obtidos para o dormitório 3 (suíte 3) e os requisitos de desempenho no inverno estabelecidos na Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) seguem no Quadro 9 a seguir.

Quadro 9 – Critério e desempenho térmico para condições de inverno – Dormitório 3

Nível de desempenho	Zona 4	Ti,mín (°C)	Te,mín (°C)	Resultados	
M	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 3 \text{ °C})$	16,8	10,6	$16,8 > 13,6$	Atende
I	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 5 \text{ °C})$	16,8	10,6	$16,8 > 15,6$	Atende
S	$T_{i,mín.} \geq (T_{e,mín.} + 7 \text{ °C})$	16,8	10,6	$16,8 < 17,6$	Não atende
<p>Ti,mín. é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius. Te,mín. é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior á edificação, em graus Celsius. M é o nível de desempenho mínimo de conforto dos usuários. I é o nível de desempenho intermediário de conforto dos usuários. S é o nível de desempenho superior de conforto dos usuários. Zona bioclimática 4 de acordo com a Parte 3 da norma NBR 15220 (ABNT, 2005).</p>					

Fonte: AUTOR, 2018

O dormitório 3 (suíte 3) apresenta um nível intermediário (I) de desempenho térmico, atendendo ao critério de desempenho térmico para condições de verão estabelecido pela Parte 1 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013). A diferença algébrica para o dormitório 1 entre $T_{i,mín.}$ e $T_{e,mín.}$ é igual 6,2 °C.

5.2.4 Adequação das vedações verticais externas

O requisito de adequação das paredes externas (painéis de vedação vertical externos em *wood frame*) é baseado nos valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) e capacidade térmica das paredes externas (CT), conforme a localização da edificação em relação a zona bioclimática definida pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e pela absorvância à radiação solar da superfície externa da parede (α).

O Quadro 10 traz o valor máximo e o resultado obtido para o critério de transmitância térmica (U) das paredes externas para a habitação unifamiliar em *wood frame* avaliada.

Quadro 10 – Requisito e resultado da transmitância térmica das paredes externas

Transmitância térmica U (W/m ² *K)					
Zona	α	Critério	Resultados		
4	> 0,6	$U \leq 2,5$	Dormitório 1	U = 0,66	Atende
			Dormitório 3	U = 0,66	Atende

Fonte: AUTOR, 2017

O Quadro 11 traz o valor máximo e o resultado obtido para o critério de capacidade térmica (CT) das paredes externas para a habitação unifamiliar em *wood frame* avaliada.

Quadro 11 – Requisito e resultado da transmitância térmica das paredes externas

Capacidade térmica CT (kJ/m ² *K)				
Zona	Critério	Resultados		
4	$CT \geq 130,0$	Dormitório 1	CT = 38,7	Não atende
		Dormitório 3	CT = 38,7	Não atende

Fonte: AUTOR, 2017

Assim, os painéis de vedação vertical externos atendem parcialmente ao requisito de adequação de paredes externas estabelecido na Parte 4 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

5.2.5 Aberturas para ventilação

O requisito de aberturas para ventilação estabelece que a habitação deva apresentar aberturas, nas fachadas, com dimensões adequadas para proporcionar a ventilação interna nos ambientes, e este requisito deve ser aplicado somente aos ambientes de longa permanência (salas e dormitórios). Os ambientes de permanência prolongada devem ter aberturas para ventilação com áreas que atendam à legislação específica do local da obra⁶.

⁶ Não há legislação específica para área de aberturas em habitações unifamiliares térreas em São Carlos – SP.

Quando não há requisitos de ordem legal no local das obras, devem ser adotados valores de área de abertura para ventilação (A) conforme a localização da edificação em relação a zona bioclimática definida pela norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

O Quadro 12 traz a área mínima e o resultado obtido para o critério de área mínima de ventilação em dormitórios e sala de estar (A) para a habitação unifamiliar em wood frame avaliada.

Quadro 12 – Requisito e resultado da área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar

Aberturas para ventilação (A)				
Zona	Critério	Resultados		
4	$A \geq 7\%$ da área de piso	Dormitório 1	A = 21,9 %	Atende
		Dormitório 3	A = 35,6 %	Atende

Fonte: AUTOR, 2017

Desta forma a área efetiva de ventilação (A), de cada um dos ambientes avaliados, atende ao requisito de área mínima de ventilação em dormitórios e salas de estar estabelecido na Parte 4 da norma NBR 15575 (ABNT, 2013).

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A vedação vertical externa avaliada apresentou um resultado de desempenho acústico satisfatório, não só atendendo ao critério mínimo de desempenho, como apresentando um nível de desempenho superior de isolamento ao ruído aéreo, obtido pelo parâmetro $D_{2m,nT,w}$. Novos ensaios poderão ser realizados, quando a habitação estiver com os forros dos beirais concluídos, para verificar uma possível melhora nos níveis de desempenho da vedação vertical externa avaliada em relação ao isolamento ao ruído aéreo. O desempenho acústico e o isolamento acústico dos elementos e componentes de uma edificação habitacional dependem de diversos fatores, como os materiais empregados (EGAN, 2007), a geometria dos elementos, possíveis frestas e pequenos orifícios que interferem negativamente no isolamento ao ruído aéreo externo e interno, entre diferentes cômodos, ou seja, do sistema construtivo como um todo.

Os resultados positivos indicam a adequabilidade o sistema construtivo em *wood frame* frente aos requisitos de desempenho acústico da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), corroborando para utilização deste sistema construtivo. Também indicam no dormitório 1, cômodo onde o ensaio de isolamento ao ruído aéreo foi localizado, a ausência de possíveis patologias construtivas, que não são necessariamente detectáveis quando a construção está acabada, como instalações elétricas mal executadas, instalação inadequada de janelas e portas, que iriam afetar negativamente o desempenho acústico.

O desempenho térmico do objeto de estudo deste trabalho para o primeiro período de análise, o mês de maio de 2017 (outono), foi satisfatório, com temperaturas dentro do nível superior estabelecido pela norma 15575 (ANBT, 2013) para avaliação do desempenho térmico.

Através da coleta de dados nos meses de agosto de 2017 e fevereiro de 2018 foi possível obter os dados de temperatura externa do ar no entorno da habitação unifamiliar avaliada para os dias típicos de inverno e de verão respectivamente.

Os dormitórios avaliados atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013) de temperatura mínima interna do ar para o dia típico de inverno e de temperatura máxima do ar para o dia típico de verão. Os dormitórios 1 e 3 apresentaram um nível de desempenho superior para o período de verão, e o dormitório 1 apresentou um nível de desempenho superior para o período de inverno, sendo que o dormitório 3 apresentou um nível de desempenho intermediário, provavelmente devido a aspectos projetuais (menor insolação no período de inverno em relação ao dormitório 1).

A transmitância térmica (U) dos painéis de vedação vertical externos da habitação unifamiliar avaliada e a área mínima de aberturas para ventilação (A%) dos dormitórios 1 e 3

avaliados, sendo estas passíveis de serem controladas pelos usuários, atenderam aos requisitos de desempenho térmico da norma NBR 15575 (ABNT, 2015), estabelecidos para a zona 4, conforme o zoneamento bioclimático definido na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

A capacidade térmica (CT) das vedações verticais externas não atendeu ao valor mínimo da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) que estabelece valor mínimo de 130 kJ para os painéis de vedação vertical externos (paredes externas). O valor mínimo de capacidade térmica (CT) acima de 130 kJ, das vedações verticais externas propostos para a zona bioclimática 4 onde está inserida a cidade de São Carlos – SP, corresponde a vedações verticais pesadas, com grande inércia térmica. As vedações verticais em *wood frame* do objeto de estudo são leves, com baixa capacidade térmica, porém são isolantes e assim, apresentaram um desempenho satisfatório, contrapondo esta indicação da norma.

Diferentes autores (SHAVIV, 2001; RORIZ, 2014), por meio da avaliação de desempenho térmico para os períodos de inverno e de verão através de simulação computacional para diferentes condições de contorno (tipologias construtivas, locais, condições de ventilação, dentre outros), indicaram que o método simplificado não é representativo e possui incongruências em relação ao procedimento de simulação computacional descrito na norma NBR 15575 (ABNT, 2013). Dentre as várias sugestões destes autores de estudos de desempenho térmico de habitações, destacam-se, para o procedimento de simulação computacional a utilização de dados climáticos anuais, por meio de dados climáticos horários de um ano representativo do clima analisado, ao invés de se utilizar os dados de um dia típico de verão e inverno para a análise, e também considerar os ganhos de calor interno da habitação (ocupação, equipamentos e iluminação artificial).

O método simplificado, que considera somente a envoltória composta pelas vedações verticais externas e pela cobertura, poderia ser mais representativo, considerando de forma mais eficiente os parâmetros que determinam o desempenho térmico, como os dados do entorno da edificação e ocupação do solo, que influenciam na ventilação, e também informando de forma mais clara, as limitações do método.

Desta forma é possível concluir que a habitação unifamiliar avaliada apresenta um desempenho térmico satisfatório para dias com grande amplitude térmica, como os de outono, dias com baixas temperaturas, como os de inverno e dias com altas temperaturas, como os de verão.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em virtude do tema deste trabalho, avaliação de desempenho de habitações em *wood frame*, envolver um sistema construtivo inovador, ainda pouco utilizado no Brasil, faz com que o universo⁷ de habitações construídas por este sistema seja pequeno, e localizado principalmente fora do estado de São Paulo, o que limitou a amostra de habitações a serem avaliadas em apenas uma, o objeto de estudo deste trabalho, uma habitação unifamiliar em *wood frame* na cidade de São Carlos-SP recém construída e ocupada.

Como o objeto de estudo é uma habitação construída e não um protótipo, existem limitações impeditivas para realização de ensaios para avaliação de desempenho de todos os sistemas que compõe a habitação estudada, excluindo-se assim ensaios destrutivos, como os feitos para a verificação do comportamento estrutural frente a solicitações de impactos (corpo duro e corpo mole), de tempo requerido de resistência ao fogo (TRRF), permeabilidade dos componentes, dentre outros.

Pelo fato do objeto de estudo ter sido recentemente concluído também se excluiu a possibilidade de se realizar uma avaliação pós-ocupação (APO) diagnóstica para identificação de possíveis defeitos e patologias do sistema construtivo *wood frame*. Foi feita somente uma inspeção visual e não foi constatada nenhuma patologia construtiva visível.

Desta forma foi feito o recorte desta pesquisa, optando-se pela realização de ensaios não destrutivos, para verificação do desempenho térmico e acústico dos painéis de vedação vertical, que compõe o sistema de vedações verticais.

Para ir de encontro a sustentabilidade, os projetos que utilizam o sistema construtivo *wood frame* poderiam adotar o uso de madeira tratada com CCB, que é menos prejudicial para o manuseio dos usuários e permite a posterior reciclagem dos componentes em madeira para confecção de placas (BERTOLINI, 2010). Também há a alternativa de utilizar madeira de alta densidade (nativa ou até plantada, como o eucalipto citriodora), desde que atendessem a resistência mínima para a demanda biológica do local onde a edificação for construída.

A reciclagem de componentes de madeira tratada com resina vegetal para confecção de placas também contribuiria para a substituição das que são atualmente empregadas, do tipo OSB e compensado, que muitas utilizam adesivos danosos ao meio ambiente e também aos

⁷ As habitações construídas através do sistema construtivo *wood frame* localizam-se principalmente na região sul do Brasil, devido a fatores histórico culturais e também pela disponibilidade de matéria-prima, fabricantes e mão-de-obra para este sistema.

usuários, quando há emissão em níveis acima do permitido de compostos orgânicos voláteis (COV's), como os formaldeídos (FERRO, 2013), assim como a utilização de placas compostas por resíduos industriais reciclados com a utilização de resina vegetal (BALDAN, 2015).

Estas possíveis mudanças trariam ainda mais vantagens para o sistema construtivo *wood frame*, um sistema construtivo leve, modular, de rápida execução, passível de ser pré-fabricado e apresentar alta qualidade em cada um dos componentes construtivos.

8 CONCLUSÕES

O desempenho acústico da habitação unifamiliar foi excelente, atingindo um nível de desempenho superior estabelecido pela norma NBR 15575 (ABNT, 2013). O desempenho térmico para o período de verão e para o período de inverno atendeu aos requisitos estabelecidos pela NBR 15575 (ABNT, 2013).

Diferentes autores (RORIZ, 2011; NAVARRO, 2016) apresentam dados que para habitações térreas, o principal sistema responsável, pela manutenção da temperatura, é o de cobertura. Desta forma, em projetos futuros em *wood frame*, uma alternativa para a redução do custo global seria a de utilizar isolante térmico nos painéis de vedação vertical externos com uma menor espessura (e consequentemente em menor quantidade), ou até suprimir seu uso, mantendo a utilização do isolante térmico no forro da cobertura. Outro fator importante para o período de verão seria a utilização de tintas claras, com alta refletância, para diminuir o ganho de calor com a incidência solar direta nos painéis de vedação vertical externos.

9 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

O trabalho desenvolvido nesta dissertação atendeu aos objetivos propostos de descrever e avaliar o sistema construtivo *wood frame* utilizado no Brasil, com base na avaliação do desempenho termoacústico de uma habitação unifamiliar construída na cidade de São Carlos - SP. Como consequência desta dissertação, são sugeridos os seguintes possíveis trabalhos futuros:

- Realizar ensaios de campo em outras vedações verticais externas e elementos específicos (portas internas e externas e esquadrias), da habitação em *wood frame* estudada;
- Estudar os materiais ser utilizadas em substituição das placas de OSB e MDF utilizadas atualmente nos painéis de vedação verticais no sistema construtivo *wood frame*;
- Avaliar a viabilidade da substituição dos componentes estruturais de madeira *pinus sp.* tratada do sistema construtivo *wood frame* estudado por madeiras nativas de alta densidade;
- Propor um sistema construtivo leve pré-fabricado em madeira que utilize componentes construtivos reciclados.

REFERÊNCIAS

- ABDI – AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Manual da Construção Industrializada: Conceitos e Etapas. Volume 1: Estrutura e Vedação. ABDI. 1 ed. Brasília, 2015.
- ADRIÃO, J. M. A. Habitação de Interesse Social em Madeira: Conjunto Habitacional no bairro Pedra 90 após 14 anos de uso. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá – MT, 2011. 116p.
- ADRIAZOLA, M. K. O. Avaliação Experimental Por Meio de Protótipos e Por Simulação de Painéis de Madeira Para Habitação de Interesse Social. Curitiba, 2008.
- AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. O Desafio da Sustentabilidade na Construção Civil. Série Sustentabilidade. Editora Blucher, 2011.
- AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). Wood frame construction manual (WFCM) 2015. Manual for one and two family dwelling. Washington: American Wood Council (AWC), 2015.
- ARAKAKI, E. M. Avaliação da durabilidade em sistema construtivo pré-fabricado com madeira de rejeito comercial. 2000. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2000.
- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Standard 55-2013. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 5628: Componentes construtivos estruturais, determinação da resistência ao fogo. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.
- _____. NBR 7190: Estruturas em madeira. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.
- _____. NBR 10004. Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 10151. Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico – Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.
- _____. NBR 14432 - Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações – Procedimento, Rio de Janeiro, 2001, 14 p.
- _____. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Habitações. Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Habitações. Parte 2: Métodos de Cálculo. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15220 – Desempenho Térmico de Habitações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 15575-1: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 15575-2: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 15575-5: Edifícios habitacionais de até 5 pavimentos – Desempenho – Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. NBR 16143: Preservação de madeiras – Sistema de categorias de uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

BALDAN, V. J. S. Desenvolvimento de caracterização de placas poliméricas produzidas a partir da reciclagem do resíduo industrial de poliuretana termofixa. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos – SP, 2015.

BARATA, Tomás Queiroz Ferreira. Propostas de painéis leves de madeira para vedação externa adequados ao zoneamento bioclimático brasileiro. Tese (Doutorado) Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2008. 264p.

BARING, J. G. D. A. Sustentabilidade e o controle acústico do meio ambiente. Acústica e Vibrações, n. 38, p. 1–6, São Paulo. Março de 2007.

BAYEH, R.; AKUTSU, M.; AQUILINO, M.; SALES, E.; BRITO, A.; VITTORINO, F. Desenvolvimento de método para medição de isolamento sonora em fachadas em andares elevados atendendo à norma NBR 15575. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia Do Ambiente Construído, 2016, São Paulo. Anais... ANTAC 2016. BISTAFA, S. R. Acústica Aplicada ao Controle do Ruído. São Paulo: Blucher, 2006.

BERTOLINI, M. S. Emprego de resíduos de *pinus sp* tratado com preservante CCB na produção de chapas de partículas homogêneas utilizando resina poliuretana à base de mamona. 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BITTENCOURT, R. M. Concepção arquitetônica da habitação em madeira. 1995. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

BITTENCOURT, R. M. Concepção arquitetônica da habitação em madeira. 1995. 257 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

BITTENCOURT, Rosa Maria; HELLMEISTER, João Cesar. Concepção arquitetônica da habitação em madeira. Boletim Técnico da escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo, 1995.

BONDUKI, N. Pioneiros da habitação social. Cem anos de política pública no Brasil. Volume 1, Nabil Bonduki, Ed. UNESP/ SESC SENAC, 2014.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução nº 001, 23 de janeiro de 1986.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução nº 307, 05 de julho de 2002.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA. Resolução nº 406, 02 de fevereiro de 2009.

BRASIL. Instituto Nacional do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, IBAMA. Lei nº 4.797, de 20 de outubro de 1965. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/qualidadeambiental/madeira/>>. Acesso em dezembro de 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Diretrizes para Avaliação Técnica de Produtos – SINAT. Diretriz SINAT No 005 – Revisão 01 – Sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”). Brasília, DF, 2016. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/projetos_sinat.php>. Acesso em maio de 2017.

BRASIL. Ministério das Cidades. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas – SINAT. DATec SINAT No 020A – Sistema de vedação vertical leve em madeira. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www.cidades.gov.br/pbqp-h/projetos_sinat.php>. Acesso em maio de 2017.

BURROWS, J. Canadian Wood-Frame House Construction. Canada Mortgage and Housing Corporation, CMHS, 2014.

CALMON, J.L. Resíduos industriais e agrícolas para a construção civil. In: Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. São Paulo: IBRACON, 2007.

CANADIAN WOOD COUNCIL (CWC). Prescriptive Residential Exterior Wood Deck Span Guide. Canadian Wood Council (CWC), Ottawa, Ontario, Canada, 2016.

COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION, CSIRO. The facts about CCA – treated timber. Austrália, 2011. Disponível em: <<http://www.csiro.au/Outcomes/Food-and-Agriculture/CCATreatedTimber.aspx>>. Acesso em dezembro de 2017.

Conselho Brasileiro de Construção Sustentável, CBS. Condutas de Sustentabilidade no Setor Imobiliário Residencial. Disponível em <http://www.cbcs.org.br/_5dotSystem/userFiles/Sobre%20CBCS/CBCS_Condutas%20de%20Acao_rev1.pdf>. 2015. Acesso em outubro de 2016.

DEMARZO, Mauro Augusto; SGAY, Rosemary Diogo. Madeira – manejo e usos: preservação. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/madeira_manejo_usos.php?num=5&title=Preserva%C3%A7%C3%A3o> acesso em: 07.mar.2011.

DEUTSCHE NORM. DIN-1052: Part 1-3: structural use timber: design and construction; buildings in timber frame construction: design and construction. Berlin: DEUTSCHE NORM, 1998.

DIAS, G. L. Estudo experimental de paredes estruturais de sistema leve em madeira (sistema plataforma) submetidas a força horizontal no seu plano. 2005. 164 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DIAS, G. L.; SZÜCS, C. A. Estudo da industrialização das habitações em madeira. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 10., 2006. São Pedro, SP. Anais ... São Pedro: EBRAMEM, 2006.

EGAN, M. D. Architectural Acoustics. New York: McGraw-Hill, 2007.

ESPÍNDOLA, L. R.; MORAES, P. D. Sistemas abertos em madeira como propostas para habitações de interesse social. In: Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira, 11., 2008. Londrina. Anais ... Londrina: EBRAMEM, 2008. 1 CD-ROM.

EUROPEAN PRESTANDARD. ENV 1995-2: EUROCODE 5, Part 2: design of timber structures: bridges. Brussels: European Committee for Standardization, 1997.

FERRO, F. S. Painéis OSB com madeira *Schizolobium amazonicum* e resina poliuretana à base de óleo de mamona: viabilidade técnica de produção. 2013. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2013.

MINTO, M. F.; ONO, R. Avaliação de desempenho de tecnologias construtivas inovadoras: manutenção e percepção dos usuários /organizadores. Porto Alegre/RS. ANTAC, 2015.

INO, A. Sistema estrutural modular em eucalipto roliço para habitação. 1991. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1992.

INO, Akemi. Projeto e construção em madeira. In: ELECS – V Encontro Nacional, III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis e II Bienal de Sustentabilidade José Lutzenberger. Minicurso. Recife/PE, 2009

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Produção da extração vegetal e da silvicultura. Rio de Janeiro: IBGE: MPOG, 2008. vol. 23. 47 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/mapa_site/mapa_site.php#economia>. Acesso em: 08 out. 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, IPT. Informações sobre madeiras. Disponível em < https://www.ipt.br/consultas_online/informacoes_sobre_madeira/busca>. Acesso em dezembro de 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 140-4 Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 4: Field measurements of airborne sound insulation between rooms. Geneva, 1998.

_____. ISO 140-5: Acoustics - Measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 5: Field measurements of airborne sound insulation of façade elements and façades. Geneva. 1998.

_____. ISO 3382 Acoustics -- Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters. Geneva, 1997.

_____. ISO 717-1 Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements. Part 1: Airborne sound insulation. Geneva, 1996.

_____. ISO 7726: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. Geneva. 1998.

_____. ISO 834-1: Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements. Geneva. 1999.

_____. ISO 16283-1: Acoustics - Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation. Geneva. 2014.

MAHAPRATA, K.; OLSSON, S. Energy Performance of Two Multi-Story Wood-Frame Passive Houses in Sweden. Article. Buildings Journal, Department of Built Environment and Energy Technology, Linnaeus University. 2015.

MARTINS, G. C. A.; MUNAIAR NETO, J.; CALIL JUNIOR, C. Análise experimental de elementos de madeira em situação de incêndio. 4º CILASCI – Congresso Ibero-Latino-Americano sobre Segurança contra Incêndio. Recife, Pernambuco. Brasil, 2017.

MATIAS-PEREIRA, J. Manual de metodologia da pesquisa científica. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

MELLO, R. L. Projetar em madeira: uma nova abordagem. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Construção sustentável. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/urbanismo-sustentavel/constru%C3%A7%C3%A3o-sustentavel>>. Acesso em dezembro de 2017.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. Sistema construtivo em *wood frame* para casas de madeira. São Paulo, SP, 2010. Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, V.31, n.2, 2010.

MOLITERNO, A. Caderno de Projetos de Telhados em Estruturas de Madeira. Editora Edgard Blücher Ltda, SP. 2ª. Edição. 1999.

MORESCHI, J. C. Biodegradação e preservação da madeira, volume II, 2ª ed. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR. Paraná, 2013.

MORGADO, L.; GUEDES, M. C.; FERREIRA, J. G.; CRUZ, H. Classificação de sistemas de construção em madeira para habitação. In: Congresso Nacional de Construção, 4, 2012, Coimbra, Portugal. Anais... CONGRESSO CONSTRUÇÃO, 2012.

NAVARRO, L.; GRACIA, A.; NIAL, D. et al. Thermal energy storage in building integrated thermal systems: a review: part 2. Integration as passive system, *Renew. Energy* 85, 2016.

NOGUEIRA, J.R. Reciclando cinzas: estudo da viabilidade para produção de blocos para a construção civil a partir da cinza volante residual de um reator de leito fluidizado. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

OLIVEIRA, E. Contribuição para análise do ciclo de vida no ambiente construído visando a energia e CO₂ embutidos no sistema construtivo *wood frame*. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

PABLOS, J. M. Estudo para reutilização do resíduo sólido constituído pelas areias de fundição aglomeradas com argila, através da técnica de solidificação/estabilização. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2008.

PENEDO, R. F.C.; OITICICA, M. L. G. R. Isolamento sonoro aéreo de partições verticais de um apartamento em Maceió AL – Brasil. *Parc research in architecture and construction*. Unicamp. Campinas – SP, 2015.

ROLNIK, R. Guerra dos Lugares: a colonização da terra e da moradia na era das finanças. São Paulo: Boitempo editorial, 2015.

ROMERO, M. A.; ORNSTEIN, S. Avaliação pós-ocupação: métodos e técnicas aplicados à habitação de interesse social. *Coletânea Habitare*. Porto Alegre – RS, 2003. 293p.

RORIZ, V. F.; CARAM, R.; RORIZ, M. Impactos das absorções e emissões efetivas de superfícies em simulações de desempenho térmico e energético de edificações. In: 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 2011, Maputo. Anais do 6º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia. Maputo, 2011.

SÁNCHEZ, J. E. P.; MARTITEGUI, F. A. MARTITEGUI, C. A.; ALVAREZ, M. A. G.; SÁNCHEZ, F. P.; NEVADO, M. A. R. Casas de madera: sistemas constructivos a base de madera aplicados a viviendas unifamiliares. *Asociación de Investigación Técnica de las Industrias de la Madera y Corcho*. AITIM, 1995.

SANTO AMORE, C.; SHIMBO L.; RUFINO, M. B.C, (org) Minha casa... e a cidade? Avaliação do programa minha casa minha vida em seis estados brasileiros. Rio de Janeiro: Letra Capital, 2015.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Cadeia produtiva da construção civil: Cenários econômicos e estudos setoriais. 1 ed. 42 p. SEBRAE, Recife, 2008.

SHAVIV, E.; YEZIORO, A.; CAPELUTO, I.G. Thermal mass and night ventilation as passive cooling design strategy, *Renew. Energy*, 2001.

SILVA, A. Comportamento diafragma de paredes de madeira no sistema leve plataforma. 142 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2004.

SILVA, C. C. Avaliação pós-ocupação do conjunto habitacional moradias Nilo II, Curitiba. Estudo de caso do uso do sistema wood frame em habitação. TCC (Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2016.

SOUZA, R. V. Aspectos ambientais e de custo de produção do sistema plataforma em madeira para Habitação de Interesse Social: estudo de caso em Florianópolis. 2013. 191 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

SZÜCS, C. A.; TEREZO, R. F.; DO VALLE, Â.; MORAES, P. D. Estruturas de Madeira. Material didático. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2006.

SZÜCS, C. P.; VELLOSO, J. G.; KRAMBECK, T. I. Racionalização da construção de sistema leve em madeira de floresta plantada voltada para habitação. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E ESTRUTURAS DE MADEIRAS, 9., 2004, Cuiabá. Anais... Cuiabá: EBRAMEM, 2004. p. 30-39.

TECVERDE. Panorama do Sistema Construtivo Tecverde. Curitiba, 2016. Disponível em <<http://www.tecverde.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Panorama-do-Sistema-Construtivo-Tecverde.pdf>>. Acesso em outubro de 2016.

TOIVONEN, R. Product quality and value from consumer perspective an application to wooden products. *Journal Forest. Economy* 18, 2012.

TOPPINEN, A.; TOIVONEN, R.; VALKEAPÄÄ, A.; RÄMÖ, A. Consumer perceptions on environmental and social responsibility of wood products in the Finnish markets. *Scand. J. Forest Research*. 28, 2013.

TORRES, J. T. C. Sistemas construtivos modernos em madeira. 2010. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de especialização em construções civis, Universidade do Porto, Porto, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA. Pesticides: Regulating Pesticides, Chromated Copper Arsenate (CCA). Estados Unidos, 2011. Disponível em: <<http://www.epa.gov/oppad001/reregistration/cca>>. Acesso em dezembro de 2017.

VALLE, I. M. R. A pré-fabricação de dois sistemas de cobertura com madeira de florestas plantadas. Estudo de casos: os assentamentos rurais Pirituba II e Sepé Tiaraju. 2011. Dissertação (Doutorado em Arquitetura) Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2011. 352 p.

VALLE, I. M. R.; INO, A.; FOLZ, R. R.; CALLIL, J. Pré-fabricação na construção em madeira. REMADE, Revista da madeira. Ed. nº 133. 2012.

VAN DE KUILEN, J.W.G.; CECCOTTI, A.; ZHOUYAN, X. Wood-concrete skyscrapers, World Conference on Timber Engineering, Riva del Garda, Italy, 2010.

WOOD UNIVERSITY. Glossary. Disponível em <www.wooduniversity.org/glossary> Acesso em dezembro de 2017.

Apêndice A – Cálculo das propriedades térmicas dos painéis de vedação vertical em *wood frame* do objeto de estudo

As propriedades térmicas, resistência térmica (R_T), transmitância térmica (U) e capacidade térmica (C_T), dos painéis de vedação verticais em *wood frame* do objeto de estudo deste trabalho, foram calculadas em conformidade com os procedimentos descritos na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

1 Painel de vedação vertical externo – área interna seca

Dados:

$$\rho_{\text{compensado naval}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{compensado naval}} = 0,15 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{compensado naval}} = 2,30 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

$$\rho_{\text{lã de rocha}} = 50 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{lã de rocha}} = 0,045 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{lã de rocha}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

$$\rho_{\text{placas de gesso}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{placas de gesso}} = 0,12 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{placas de gesso}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

1.1 Resistência térmica (R_T)

$$R_T = \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}} + \frac{e_{\text{lã de rocha}}}{\lambda_{\text{lã de rocha}}} + \frac{e_{\text{placa de gesso}}}{\lambda_{\text{placa de gesso}}} + R_{ar}$$

$$R_T = \frac{2 * 0,012}{0,15} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,0125}{0,35} + 0,16$$

$$R_T = 1,47 \text{ (m}^2 * \text{K)/W}$$

1.2 Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{1,47}$$

$$U = 0,68 \text{ W}/(\text{m}^2 * \text{K})$$

1.3 Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i * c_i * \rho_i = \sum_{i=1}^3 (e * c * \rho)_{compensado} + (e * c * \rho)_{l\tilde{a} \text{ de rocha}} + (e * c * \rho)_{gesso}$$

$$C_T = 2 * (0,012 * 2,30 * 500) + (0,05 * 0,75 * 50) + (0,0125 * 0,84 * 875)$$

$$C_T = 38,7 \text{ kJ}/(\text{m}^2 * \text{K})$$

2 Painel de vedação vertical externo – área interna molhada

Dados:

$$\rho_{\text{compensado naval}} = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{compensado naval}} = 0,15 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$$

$$c_{\text{compensado naval}} = 2,30 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$$

$$\rho_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 50 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 0,045 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$$

$$c_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 1,34 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$$

$$\rho_{\text{placas de gesso}} = 500 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{placas de gesso}} = 0,12 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$$

$$c_{\text{placas de gesso}} = 1,34 \text{ kJ}/(\text{kg} * \text{K})$$

$$\rho_{\text{revestimento cerâmico}} = 2000 \text{ kg}/\text{m}^3$$

$$\lambda_{\text{revestimento cerâmico}} = 1,10 \text{ W}/(\text{m} * \text{K})$$

$$c_{\text{revestimento cerâmico}} = 0,98 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

2.1 Resistência térmica (R_T)

$$R_T = \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}} + \frac{e_{\text{lã de rocha}}}{\lambda_{\text{lã de rocha}}} + \frac{e_{\text{placa de gesso}}}{\lambda_{\text{placa de gesso}}} + \frac{e_{\text{rev cerâmico}}}{\lambda_{\text{rev cerâmico}}} + R_{ar}$$

$$R_T = \frac{2 * 0,012}{0,15} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,0125}{0,35} + \frac{0,012}{1,10} + 0,16$$

$$R_T = 1,48 \text{ (m}^2 \cdot \text{K)/W}$$

2.2 Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{1,48}$$

$$U = 0,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

2.3 Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i * c_i * \rho_i$$

$$C_T = \sum_{i=1}^3 (e * c * \rho)_{\text{compensado}} + (e * c * \rho)_{\text{lã de rocha}} + (e * c * \rho)_{\text{gesso}} + (e * c * \rho)_{\text{cerâmico}}$$

$$C_T = 2 * (0,012 * 2,30 * 500) + (0,05 * 0,75 * 110) + (0,0125 * 0,84 * 875) + (0,012 * 0,98 * 2000)$$

$$C_T = 62,2 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

3 Painel de vedação vertical interno – área interna seca

Dados:

$$\rho_{\text{compensado naval}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{compensado naval}} = 0,15 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{compensado naval}} = 2,30 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

$$\rho_{\text{lã de rocha}} = 50 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{lã de rocha}} = 0,045 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{lã de rocha}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

$$\rho_{\text{placas de gesso}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{placas de gesso}} = 0,12 \text{ W/(m}^{\circ}\text{K)}$$

$$c_{\text{placas de gesso}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}^{\circ}\text{K)}$$

4.1 Resistência térmica (R_T)

$$R_T = \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}} + \frac{e_{\text{lã de rocha}}}{\lambda_{\text{lã de rocha}}} + \frac{e_{\text{placa de gesso}}}{\lambda_{\text{placa de gesso}}} + R_{ar}$$

$$R_T = \frac{2 * 0,012}{0,15} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{2 * 0,0125}{0,35} + 0,16$$

$$R_T = 1,51 \text{ (m}^2 * K)/W$$

4.2 Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{1,51}$$

$$U = 0,66 \text{ W/(m}^2 * K)$$

4.3 Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i * c_i * \rho_i = \sum_{i=1}^3 (e * c * \rho)_{compensado} + (e * c * \rho)_{l\tilde{a} \text{ de rocha}} + (e * c * \rho)_{gesso}$$

$$C_T = 2 * (0,012 * 2,30 * 500) + (0,05 * 0,75 * 110) + 2 * (0,0125 * 0,84 * 875)$$

$$C_T = 57,9 \text{ kJ}/(m^2 * K)$$

4 Painel de vedação vertical interno – área interna molhada

Dados:

$$\rho_{\text{compensado naval}} = 500 \text{ kg}/m^3$$

$$\lambda_{\text{compensado naval}} = 0,15 \text{ W}/(m * K)$$

$$c_{\text{compensado naval}} = 2,30 \text{ kJ}/(kg * K)$$

$$\rho_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 50 \text{ kg}/m^3$$

$$\lambda_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 0,045 \text{ W}/(m * K)$$

$$c_{\text{l\tilde{a} de rocha}} = 1,34 \text{ kJ}/(kg * K)$$

$$\rho_{\text{placas de gesso}} = 500 \text{ kg}/m^3$$

$$\lambda_{\text{placas de gesso}} = 0,12 \text{ W}/(m * K)$$

$$c_{\text{placas de gesso}} = 1,34 \text{ kJ}/(kg * K)$$

$$\rho_{\text{revestimento cerâmico}} = 2000 \text{ kg}/m^3$$

$$\lambda_{\text{revestimento cerâmico}} = 1,10 \text{ W}/(m * K)$$

$$c_{\text{revestimento cerâmico}} = 0,98 \text{ kJ}/(kg * K)$$

6.1 Resistência térmica (R_T)

$$R_T = \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}} + \frac{e_{\text{l\tilde{a} de rocha}}}{\lambda_{\text{l\tilde{a} de rocha}}} + \frac{e_{\text{placa de gesso}}}{\lambda_{\text{placa de gesso}}} + \frac{e_{\text{rev cerâmico}}}{\lambda_{\text{rev cerâmico}}} + R_{ar}$$

$$R_T = \frac{2 * 0,012}{0,15} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{2 * 0,0125}{0,35} + \frac{0,012}{1,10} + 0,16$$

$$R_T = 1,52 (m^2 * K)/W$$

6.2 Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{1,52}$$

$$U = 0,66 W/(m^2 * K)$$

6.3 Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i * c_i * \rho_i$$

$$C_T = \sum_{i=1}^3 (e * c * \rho)_{compensado} + (e * c * \rho)_{lã\ derocha} + (e * c * \rho)_{gesso} + (e * c * \rho)_{cerâmico}$$

$$C_T = 2 * (0,012 * 2,30 * 500) + (0,05 * 0,75 * 110) + 2 * (0,0125 * 0,84 * 875) + (0,012 * 0,98 * 2000)$$

$$C_T = 71,4 kJ/(m^2 * K)$$

Apêndice B – Cálculo das propriedades térmicas da cobertura do objeto de estudo

As propriedades térmicas, resistência térmica (R_T), transmitância térmica (U), capacidade térmica (C_T), e fator solar (FS_0) do sistema de cobertura em *wood frame* do objeto de estudo deste trabalho, foram calculadas em conformidade com os procedimentos descritos na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

Dados:

Compensado naval:

$$\rho_{\text{compensado naval}} = 500 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{compensado naval}} = 0,15 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

$$c_{\text{compensado naval}} = 2,30 \text{ kJ/(kg}^*\text{K)}$$

Lã de rocha:

$$\rho_{\text{lã de rocha}} = 50 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{lã de rocha}} = 0,045 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

$$c_{\text{lã de rocha}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}^*\text{K)}$$

Telha cerâmica:

$$\rho_{\text{cerâmica}} = 1400 \text{ kg/m}^3$$

$$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,90 \text{ W/(m}^*\text{K)}$$

$$c_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg}^*\text{K)}$$

Condições da câmara de ar:

$S/L > 30$ logo a câmara de ar é muito ventilada

1.1 No verão

$$R_{AR} = 0,21 \text{ (m}^2 \cdot \text{K) / W}$$

Resistência térmica

$$R_T = \frac{e_{\text{telha cerâmica}}}{\lambda_{\text{telha cerâmica}}} + \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{lã de rocha}}}{\lambda_{\text{lã de rocha}}} + \frac{e_{\text{compensado naval}}}{\lambda_{\text{compensado naval}}}$$

$$R_T = \frac{0,03}{0,90} + \frac{0,012}{0,15} + 0,21 + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,012}{0,15}$$

$$R_T = 1,51 \text{ (m}^2 * K\text{)}/W$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{1,51}$$

$$U = 0,66 \text{ W}/(\text{m}^2 * K)$$

1.2 No inverno

Resistência térmica

$$R_T = 2 * R_{SI} + R_{l\tilde{a} \text{ de rocha}} + R_{compensado}$$

$$R_T = 2 * 0,1 + \frac{0,05}{0,12} + \frac{0,012}{0,15}$$

$$R_T = 0,7 \text{ (m}^2 * K\text{)}/W$$

Transmitância térmica (U)

$$U = \frac{1}{R_T}$$

$$U = \frac{1}{0,7}$$

$$U = 1,44 \text{ W}/(\text{m}^2 * K)$$

1.3 Capacidade térmica (C_T)

$$C_T = \sum_{i=1}^n e_i * c_i * \rho_i = \sum_{i=1}^3 (e * c * \rho)_{telha} + (e * c * \rho)_{l\tilde{a} \text{ de rocha}} + (e * c * \rho)_{compensado}$$

$$C_T = (0,03 * 0,92 * 1400) + 2 * (0,012 * 2,30 * 500) + (0,05 * 0,75 * 50)$$

$$C_T = 68,2 \text{ kJ}/(m^2 * K)$$

1.4 Fator solar para o verão

Resistência térmica

$$\alpha = 0,3 \text{ (cor externa branca)}$$

$$F_{S0} = 4 * U * \alpha$$

$$F_{S0} = 4 * 0,66 * 0,3$$

$$F_{S0} = 0,8 \%$$

Apêndice C – Cálculo das áreas de abertura para ventilação

As áreas de abertura para ventilação dos cômodos de maior ocupação avaliados, os dormitórios 1 e 3, foram calculadas em conformidade com os procedimentos descritos na norma NBR 15220 (ABNT, 2005).

1.1 Dormitório 1 (suíte 1)

Dados

$$A = 4,2 \text{ m}^2$$

$$A_P = 19,2 \text{ m}^2$$

Área de abertura (A) para ventilação em porcentagem

$$A = \frac{A}{A_P} * 100 = \frac{4,2}{19,2} * 100 = 21,9 \%$$

1.2 Dormitório 3 (suíte 3)

Dados

$$A = 3,9 \text{ m}^2$$

$$A_P = 11,0 \text{ m}^2$$

Área de abertura (A) para ventilação em porcentagem

$$A = \frac{A}{A_P} * 100 = \frac{3,9}{11,0} * 100 = 35,6 \%$$

Anexo A – Planta térrea do objeto de estudo

Medidas em centímetros.

Anexo B – Esquadrias do objeto de estudo

QUADRO DE ESQUADRIAS-PORTAS				
SIMB.	QTD.	LARG.	ALT.	
P01	1x	110	230	
P02	8x	80	210	
P03	1x	70	210	
P04	2x	70	210	CORRER 01 FL.
P05	1x	405	210	VENT. E ILUMIN. NATURAL
P06	2x	80	210	CORRER
P07	1x	80	210	VENT. E ILUMIN. NATURAL
P08	1x	90	210	CORRER 02 FLs.
P09	1x	100	210	
P10	1x	70	100	ACESSO CAIXA D'ÁGUA

QUADRO DE ESQUADRIAS-CAIXILHOS					
SIMB.	QTD.	LARG.	ALT.	PEIT.	ÁREA
J01	2x	120	140	90	1,68m ²
J02	2x	210	65	340	1,37m ²
J03	3x	70	90	140	0,63m ²
J04	1x	120	120	110	1,44m ²
J05	1x	200	120	110	2,40m ²
J06	1x	70	50	360	0,35m ²
J07	2x	160	140	90	2,24m ²
J08	2x	70	140	90	0,98m ²

Anexo C – Planta de cobertura do objeto de estudo