



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
**Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura**

**Sistema construtivo em *Wood Frame*: Desempenho Térmico das  
Vedações Verticais e Potencial de Aplicação para Habitação Social  
em Foz do Iguaçu-PR**

BÁRBARA BRAUHARDT

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2016



**Ministério da Educação**  
**Universidade Federal da Integração Latino-Americana**  
**Instituto de Tecnologia, Infraestrutura e Território**  
**Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura**

**Sistema construtivo *Wood Frame*: Desempenho Térmico das  
Vedações Verticais e Potencial de Aplicação para Habitação Social  
em Foz do Iguaçu**

BÁRBARA BRAUHARDT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura da UNILA, como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

**Orientador:** Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Helenice Maria Sacht

Foz do Iguaçu, PR  
Dezembro de 2016

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais Ivo e Jussara, como forma de agradecimento por todo o amor, apoio e confiança depositados em mim ao longo da minha existência.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e força para seguir em frente,

Aos meus pais, Ivo e Jussara,  
aos quais devo tudo o que sou e se consegui finalizar essa árdua etapa foi com a ajuda de  
você e por você!

Aos meus irmãos: Ana, Cristian, Débora e Michelli, por me apoiarem sempre.

A minha avó Hilda por todo o amor, palavras de incentivo e por todas as blusas de crochê  
que confeccionou para mim.

Aos meus avós Fritz e Rosinha, que levo em meu coração e sinto muita falta.

Ao Oliver pelas doses diárias de amor e alegria.

Aos demais familiares que mesmo estando longe, fazem-se presente.

A minha Orientadora Prof. Dra. Helenice,  
pela valiosa orientação, por compartilhar comigo os seus conhecimentos e principalmente  
por ter confiado em mim. À você professora, meus sinceros agradecimentos!

Ao Cesar, por toda ajuda, apoio e dedicação ao longo desses anos. Obrigada por tudo e  
espero que nossos sonhos se realizem!

A família do Cesar por todo o apoio e por me receberem tão bem em sua casa.

Aos amigos que fiz ao longo dessa jornada,  
especialmente aos amigos: Iva, Raul, Tales e Victor pela amizade construída.

Aos professores da Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA que  
contribuíram para a minha formação.

A Universidade Federal da Integração Latino-Americana – UNILA,  
da qual tenho muito orgulho de fazer parte da primeira turma histórica.

A todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização desse trabalho  
e aos que torceram por mim, muito obrigada!

*“Nunca deixe que lhe digam que não vale a  
pena*

*Acreditar no sonho que se tem*

*Ou que seus planos nunca vão dar certo*

*Ou que você nunca vai ser alguém*

*(...)*

*Se você quiser alguém em quem confiar  
confie em si mesmo*

*Quem acredita sempre alcança...”*

*(Renato Russo).*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição do déficit habitacional por unidade de federação em 2014. ....	18
Figura 2. Distribuição do déficit habitacional total no Brasil em 2014. ....	18
Figura 3. Distribuição do déficit habitacional na região sul do Brasil em 2014. ....	19
Figura 4. Blocos laminares sobre pilotis, Conjunto Residencial Vila Guiomar, Santo André-SP, década de 50, obra do IAPI. ....	21
Figura 5. Blocos serpenteantes e laminares, Conjunto Residencial de Deodoro, Rio de Janeiro, década de 50, obra da FCP. ....	21
Figura 6a-b. Dados do MCMV até setembro de 2015. ....	24
Figura 7. Esquema de habitação em Wood Frame. ....	27
Figura 8. Construção em Wood Frame na cidade de Banff no Canadá. ....	28
Figura 9. Detalhe em alto padrão na construção em Wood Frame no Canadá. ....	28
Figura 10. Sistema Balloon Framing. ....	29
Figura 11. Sistema <i>Platform Framing</i> . ....	29
Figura 12. Montagem de unidade habitacional, residencial Haragano, em Pelotas-RS. ....	31
Figura 13. Unidades habitacionais finalizadas, residencial Haragano, em Pelotas-RS. ....	31
Figura 14. Montagem de unidade habitacional. Condomínio Moradias Nilo, Curitiba-PR. ....	32
Figura 15. Unidades habitacionais finalizadas. Condomínio Moradias Nilo, Curitiba-PR. ....	32
Figura 16. Primeiro prédio em Wood Frame no Brasil. ....	33
Figura 17. Face externa do prédio em Wood Frame. ....	33
Figura 18. Fases da transmissão de calor em um fechamento opaco vertical. ....	36
Figura 19. Recomendações para o clima de Foz do Iguaçu-PR. ....	46
Figura 20. Roteiro de estudo de caso. ....	49
Figura 21. Corte Seção transversal do painel de <i>Wood Frame</i> analisado. ....	50
Figura 22. Planta do painel em Wood Frame analisado. ....	51
Figura 23. Corte seção transversal do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro. ...	51
Figura 24. Planta do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro. ....	52
Figura 25. Corte seção transversal do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro. ...	52
Figura 26. Planta do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro. ....	53
Figura 27. Parede em alvenaria analisada. ....	53
Figura 28. Interface do programa THERM 7.4. ....	57
Figura 29. Atribuição da câmara de ar no painel em Wood Frame. ....	59
Figura 30. Atribuição da condição de contorno externa. ....	59
Figura 31. Composição da parede externa de áreas secas. ....	63
Figura 32. Resultados da Resistência térmica. ....	67
Figura 33. Resultados da Transmitância térmica. ....	67
Figura 34. Resultados da Capacidade térmica. ....	67
Figura 35. Resultados do Fator solar. ....	67
Figura 36. Resultados do Atraso térmico. ....	67
Figura 37. Comparação do Fluxo de calor entre as configurações de parede. ....	72
Figura 38. Comparação da resistência térmica calculada pela NBR 15220-2 e pelo THERM 7.4. ....	72
Figura 39. Comparação da transmitância térmica calculada pela NBR 15220-2 e pelo THERM 7.4. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estimativa do déficit habitacional total por situação de domicílio no Brasil em 2012, 2013 e 2014.....	17
Tabela 2. Estimativa do déficit habitacional total por situação de domicílio na Região Sul do Brasil em 2014. ....	19
Tabela 3. Unidades habitacionais construídas pelos IAPs e FCP (1937-64). ....	21
Tabela 4. Detalhes do Programa Minha Casa Minha Vida.....	23
Tabela 5. Agentes de combate ao déficit habitacional no Brasil: breve histórico. ....	24
Tabela 6. Exemplos de unidades habitacionais em Wood Frame no âmbito do MCMV. ....	33
Tabela 7. Valores de absorvância ( $\alpha$ ) e emissividade ( $\epsilon$ ). ....	38
Tabela 8. Condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico. ....	40
Tabela 9. Resistência térmica de ar não ventiladas. ....	41
Tabela 10. Resistência térmica superficial Interna e Externa. ....	42
Tabela 11. Regiões fundamentais e classes climáticas de Foz do Iguaçu-PR, segundo a classificação de Köppen-Geiger. ....	44
Tabela 12. Transmitância térmica das paredes externas - valores máximos admissíveis.....	47
Tabela 13. Capacidade Térmica de paredes externas - valores mínimos admissíveis. ....	47
Tabela 14. Propriedades dos materiais componentes das camadas do painel em <i>Wood Frame</i> e da parede em alvenaria convencional.....	55
Tabela 15. Propriedades térmicas utilizadas no THERM 7.4. ....	58
Tabela 16. Critério de avaliação de desempenho térmico – Condições de Verão. ....	60
Tabela 17. Critério de avaliação de desempenho térmico – Condições de Inverno. ....	60
Tabela 18. Condições de contorno utilizadas na simulação computacional.....	61
Tabela 19. Aspectos construtivos do Wood Frame. ....	64
Tabela 20. Resultados do cálculo das propriedades térmicas baseado na NBR 15220-2. ...	66
Tabela 21. Resultados das propriedades térmicas calculadas pelo THERM 7.4. ....	70
Tabela 22. Resultados das propriedades térmicas calculadas pelo THERM 7.4. ....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características dos projetos da FCP e IAPs.....	21
Quadro 2. Fases da transmissão de calor em um fechamento opaco vertical.....	36
Quadro 3. Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.....	45
Quadro 4. Condição de Inverno para o nível mínimo de desempenho.....	74
Quadro 5. Condição de Verão para o nível mínimo de desempenho.....	75

## RESUMO

Diante do déficit habitacional de 6,068 milhões de moradias, a carência habitacional é um dos maiores desafios enfrentados pelo Brasil. Isso deve impulsionar o estudo de soluções tecnológicas para a produção de habitações com desempenho satisfatório, principalmente o desempenho térmico, que muitas vezes não recebe a devida importância. Uma opção seria o *Wood Frame*, sistema consolidado em países de primeiro mundo, que apresenta rápida execução, redução de desperdícios, além de elevado controle de qualidade. O presente trabalho possui como objetivo principal elaborar um estudo comparativo do desempenho térmico dos painéis de vedação entre o sistema construtivo em alvenaria convencional e o sistema construtivo em *Wood Frame*. Diante disso, foi realizado um estudo de caso *in loco* referente à aplicação do *Wood Frame* em habitações sociais no Paraná, principalmente para conhecer melhor as características do sistema e levantar informações para auxiliar na avaliação de desempenho térmico dos painéis de vedação normalmente empregados no sistema, e ainda, verificar o potencial de aplicação do *Wood Frame* na construção de habitações de interesse social na cidade de Foz do Iguaçu-PR. Posteriormente, foram determinadas, por meio do cálculo, as propriedades térmicas das paredes analisadas e, executadas simulações de desempenho térmico de variações do painel no programa THERM 7.4, tendo como parâmetros as características climáticas de Foz do Iguaçu-PR e as normas NBR15220 e NBR15575, para comparação à alvenaria convencional. De forma geral, os painéis em *Wood Frame* apresentaram um bom desempenho térmico quando comparados à alvenaria, principalmente nas propriedades de resistência e transmitância térmica. Ressalta-se que a utilização das câmaras de ar e isolantes térmicos reduzem ainda mais a passagem de calor através do painel, contribuindo para o seu desempenho térmico.

**Palavras-chave:** Desempenho térmico; Sistemas Construtivos; *Wood Frame*; Habitação de interesse social; Simulação Computacional.

## ABSTRACT

The lack of housing in Brazil is of 6,068 million of dwellings, one of the biggest challenges of the country, this situation must encourage the research of technological solutions for the production of satisfactory performance houses, mainly having in consideration the thermal performance, property that is not being analyzed in most of the cases. *Wood Frame* housing system could be an option. It is a technic very used in North America, Asia and Europe, presents quick execution and less waste, and also high quality controls. This research main objective is to make a comparative study about the conventional masonry system with the Wood Frame construction system, mainly about the thermal performance of the sealing panels. A case study was realized about the application of wood frame system for low cost housing in the state of Paraná, mainly to know the properties of the system and to collect data to improve the evaluation of the sealing panels thermal performance used in the system, and to verify the application feasibility in the city of Foz do Iguaçu. Then were calculated the thermal properties of the walls to execute simulations of the thermal performance variations with the help of the software THERM 7.4, having as parameters the Brazilian Codes NBR 15220 and NBR 15575, and climate characteristics of the city of Foz do Iguaçu to make the comparison with the traditional masonry system. The wood frame panels presented good thermal performance, when compared to the conventional masonry system, principally in thermal resistance properties and thermal transmittance. Furthermore, it is worth noting that frame cavity and thermal insulates reduces more the heat flow through the panel, contributing to the thermal performance.

**Keywords:** Construction systems; Thermal performance; Low-cost housing; *Wood Frame*, Computational simulation

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	12
2. OBJETIVOS .....	14
3. PANORAMA DA HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL.....	15
3.1. Déficit Habitacional no Brasil .....	15
3.2. Programas Habitacionais Brasileiros .....	20
4. SISTEMA <i>WOOD FRAME</i> NA PRODUÇÃO DE HABITAÇÃO.....	26
4.1. Sistema Construtivo <i>Wood Frame</i> .....	26
4.2. Uso do <i>Wood Frame</i> na Produção de Habitação de Interesse Social no Brasil .....	30
5. DESEMPENHO TÉRMICO DAS VEDAÇÕES VERTICAIS .....	35
5.1. Transmissão de Calor nas Vedações Verticais.....	35
5.2. Propriedades Térmicas dos Materiais.....	38
5.3. O Clima de Foz do Iguaçu e as Recomendações em Relação à Vedações Verticais.....	44
5.3.1. Análise Climática x Desempenho Térmico no contexto da NBR 15220-3 .....	45
5.4. Análise Climática x Desempenho Térmico no contexto da NBR 15575-1 e NBR 15575-4 .....	46
6. METODOLOGIA.....	48
6.1 Elaboração da Revisão Bibliográfica.....	48
6.2 Estudo de Caso .....	49
6.3 Paredes Analisadas.....	50
6.4 Cálculo das propriedades térmicas dos materiais.....	54
6.5 Simulação computacional .....	56
6.5.1 Software THERM 7.4 .....	56
6.5.2 Execução das simulações computacionais.....	57
6.5.3 Análise dos resultados das simulações .....	62
7. RESULTADOS.....	63
7.1 Estudo De Caso.....	63
7.2 Cálculo das Propriedades Térmicas dos materiais .....	66
7.3. Simulações Computacionais.....	69
7.3.1 Cálculo das propriedades térmicas pela simulação computacional .....	69
7.3.2. Resultados das Simulações Computacionais.....	73
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	80
APÊNDICES.....	85

# 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

O déficit habitacional estimado no Brasil de acordo com o estudo mais recente realizado pela Fundação João Pinheiro (FJP, 2016) em parceria com a Secretaria Nacional de Habitação do Ministério das Cidades, é de 6,068 milhões de domicílios para o ano de 2014, onde 87,59% do total, correspondente a 5,315 milhões de unidades estão localizados em áreas urbanas. Na região sul do Brasil especificamente, o déficit é de aproximadamente 645 mil unidades, sendo que o estado do Paraná corresponde a 39,92% do déficit total da região, seguido pelo Rio Grande do Sul e Santa Catarina, que correspondem a 35,94% e 24,14%, respectivamente (FJP, 2016).

Diante desse cenário, a carência habitacional é um dos maiores desafios enfrentado pelo Brasil e deve impulsionar o estudo de soluções tecnológicas para a produção e/ou reabilitação de habitações que atendam a demanda de moradias e que ao mesmo tempo tenham um desempenho satisfatório, seja por meio de melhorias em sistemas construtivos aplicados no Brasil, ou pela inserção de novas tecnologias (SACHT, 2008). Dentre as opções, encontra-se o sistema construtivo em *Wood Frame*. Trata-se de um sistema industrializado, estruturado em perfis de madeira reflorestada tratada, leve, durável, que apresenta rápida execução e redução de desperdícios, além de elevado controle de qualidade, amplamente utilizado em países da América do Norte, Ásia e Europa e vem conquistando espaço na América Latina, em países como o Chile, e recentemente no Brasil (MOLINA, JUNIOR, 2010).

De acordo com Moraes e Lima (2009), a construção industrializada se caracteriza pela velocidade de execução aliada à qualidade do produto final e deriva da pré-fabricação de componentes da obra dividida em módulos. A utilização de estruturas pré-fabricadas racionaliza o processo construtivo, tendo em vista que os componentes chegam à obra apenas no momento da montagem, evitando o estoque de peças e proporcionando um canteiro de obra mais limpo e com menos resíduos. O processo de industrialização oferece qualidade, durabilidade, desempenho e sustentabilidade associados à rapidez de execução (MORAES, LIMA, 2009).

O sistema *Wood Frame* tem sido a opção escolhida para a construção de milhões de casas na América do Norte (CMHC, 2014). Nos Estados Unidos especificamente, o

*Wood Frame* é o método predominante na construção de casas e apartamentos e cada vez mais, está sendo utilizado em construções comerciais e industriais (AWC, 2001).

Apesar da construção em madeira ser difundida em países de primeiro mundo, ainda há o preconceito com relação ao uso desse material. Segundo Calil Jr, Lahr (2007), o preconceito referente ao uso da madeira está relacionado principalmente à insuficiente divulgação das informações tecnológicas quanto ao seu desempenho sob as diferentes condições de serviço e à falta de projetos específicos desenvolvidos por profissionais habilitados.

Portanto, diante da atual carência habitacional e a necessidade de estudo de novas tecnologias, esta pesquisa justifica-se, pois, o *Wood Frame* é um sistema promissor quanto à redução de prazos de entrega, redução de desperdícios e elevado controle de qualidade, além de utilizar madeira plantada como matéria-prima de produção, características que tornam o *Wood Frame* em um sistema construtivo extremamente competitivo em relação à rapidez e sustentabilidade das construções quando comparado com demais sistemas aplicados atualmente na construção civil brasileira.

## 2 OBJETIVOS

Elaborar um estudo comparativo do desempenho térmico dos painéis de vedação entre o sistema construtivo em alvenaria convencional e o sistema construtivo em *Wood Frame* e, além disso, analisar a viabilidade de aplicação do último sistema na construção de habitações de interesse social na cidade de Foz do Iguaçu-PR, tendo em vista as características climáticas.

### 2.2. Objetivos Específicos

Para a realização do presente trabalho foi necessário o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos:

- a) Realizar um estudo de caso *in loco*, em construções habitacionais nas quais o sistema foi empregado, de forma a aprofundar os conhecimentos sobre a aplicação na prática;
- b) Avaliar do desempenho térmico da parede (painel) normalmente empregada no sistema *Wood Frame*, tendo como base resultados da determinação das propriedades térmicas e simulações computacionais do desempenho térmico, tendo como parâmetros a análise das condições climáticas de Foz do Iguaçu-PR e as indicações das normas NBR15220: Parte 2 (ABNT, 2005), NBR15575: Parte 1 (ABNT, 2013a) e NBR15575: Parte 4 (ABNT, 2013b);
- c) Apresentar aspectos que indiquem que a aplicação do sistema *Wood Frame* em habitação tem como consequência construções com maior eficiência energética e menor desperdício de materiais.

## **3 PANORAMA DA HABITAÇÃO SOCIAL NO BRASIL**

O presente capítulo tem como objetivo apresentar, de forma breve, o panorama da habitação social no Brasil. Assim, na seção 3.1 é abordado o tema do déficit habitacional no Brasil, onde é apresentado o conceito e o déficit atual de moradias estimado para o país e na seção 3.2 é apresentado um breve histórico sobre a habitação social e os programas criados em busca de soluções para o problema de moradia no Brasil. Essa abordagem é de extrema importância, tendo em vista que o estudo do sistema *Wood Frame* será destinado ao uso em habitação de interesse social.

### **3.1. Déficit Habitacional no Brasil**

O déficit habitacional é uma realidade dos países da América Latina e no Brasil essa situação não é diferente. Os dados mais recentes sobre o déficit habitacional brasileiro são provenientes de um estudo publicado pela Fundação João Pinheiro em 2016 (FJP, 2016) em parceria com a Secretaria Nacional de Habitação do Ministério das Cidades, titulado como: “O Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014”. Neste estudo o déficit habitacional é definido tal como segue:

“O conceito de déficit habitacional utilizado está ligado diretamente às deficiências do estoque de moradias. Engloba aquelas sem condições de serem habitadas em razão da precariedade das construções ou do desgaste da estrutura física e que por isso devem ser repostas. Inclui ainda a necessidade de incremento do estoque em função da coabitação familiar forçada (famílias que pretendem constituir um domicílio unifamiliar), dos moradores de baixa renda com dificuldades de pagar aluguel e dos que vivem em casas e apartamentos alugados com grande densidade. Inclui-se ainda nessa rubrica a moradia em imóveis e locais com fins não residenciais. O déficit habitacional pode ser entendido, portanto, como déficit por reposição de estoque e déficit por incremento de estoque.”

De acordo com a FJP (2016), o conceito de déficit por reposição de estoque engloba os domicílios rústicos, que são domicílios sem paredes de alvenaria ou madeira aparelhada, aos quais deveria ser acrescida parcela devida à depreciação do domicílio. A depreciação do

domicílio, por sua vez, se enquadra no déficit por reposição, visto que há o pressuposto de um limite para a vida útil do imóvel, onde dependendo da conservação do imóvel, pode ser exigido apenas reparos na estrutura física ou a substituição completa do mesmo. Ainda segundo a FJP (2016), o conceito de déficit por incremento de estoque, engloba os domicílios improvisados, que abrangem todos os locais e imóveis sem fins residenciais e lugares que servem como moradia alternativa, parte da coabitação familiar e dois tipos de domicílios alugados: os domicílios fortemente adensados e os domicílios onde famílias pobres, com renda familiar de até três salários mínimos pagam 30% ou mais da renda familiar para o locador.

Os dados do estudo “O Déficit Habitacional no Brasil 2011-2012” (FJP, 2015) mostram que o déficit habitacional estimado em 2012 no Brasil, em termos absolutos, foi de 5,430 milhões de domicílios, sendo que 85,88% do valor total, correspondente a 4,644 milhões de moradias está predominantemente concentrado em áreas urbanas. O estudo “O Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014” (FJP, 2016), apresenta uma estimativa para o ano de 2013 de 5,846 milhões de unidades habitacionais, onde 85,71% ou 5,010 milhões de unidades correspondem a áreas urbanas. Em 2014, o déficit habitacional estimado foi de 6,068 milhões de unidades e a porcentagem do déficit habitacional urbano aumentou para 87,59%, correspondente a 5,315 milhões de unidades habitacionais (**Tabela 1**).

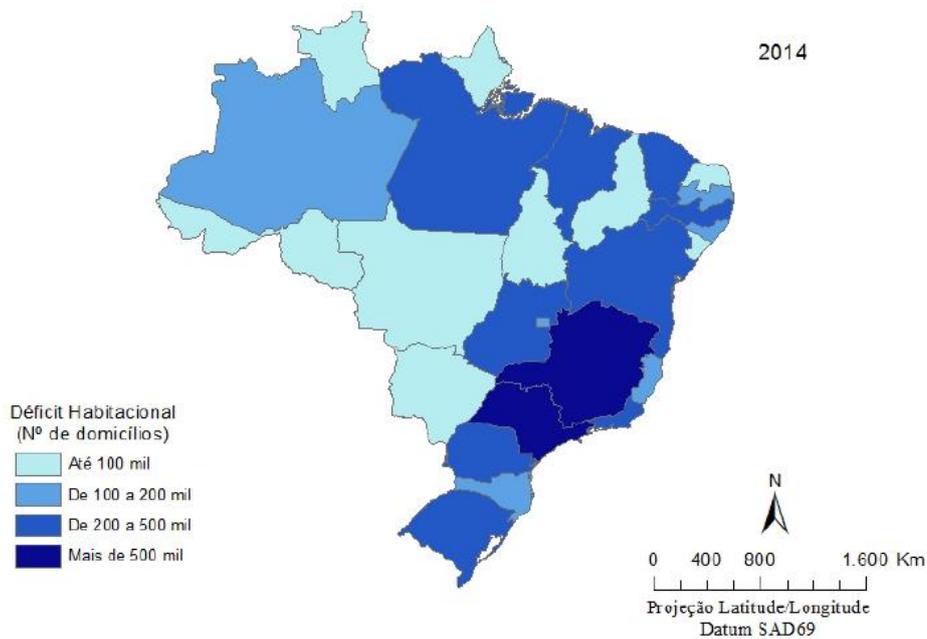
**Tabela 1.** Estimativa do déficit habitacional total por situação de domicílio no Brasil em 2012, 2013 e 2014.

Ano	Especificação	Déficit Habitacional		
		Total	Urbano	Rural
2012	Norte	564.620	448.653	115.967
	Nordeste	1.777.212	1.238.995	538.217
	Sudeste	2.108.602	2.054.557	54.045
	<b>Sul</b>	550.726	507.838	42.888
	<b>Centro-Oeste</b>	429.402	414.070	15.332
	<b>Brasil</b>	<b>5.430.562</b>	<b>4.664.113</b>	<b>766.449</b>
2013	<b>Norte</b>	652.998	508.147	144.851
	<b>Nordeste</b>	1.844.141	1.275.263	568.878
	Sudeste	2.246.364	2.192.692	53.672
	Sul	628.104	581.579	46.525
	<b>Centro-Oeste</b>	474.433	453.158	21.275
	<b>Brasil</b>	<b>5.846.040</b>	<b>5.010.839</b>	<b>835.201</b>
2014	<b>Norte</b>	632.067	498.787	133.280
	<b>Nordeste</b>	1.900.646	1.389.189	511.457
	Sudeste	2.425.679	2.376.198	49.481
	Sul	645.189	608.807	36.382
	Centro-Oeste	464.480	442.270	22.210
	<b>Brasil</b>	<b>6.068.061</b>	<b>5.315.251</b>	<b>752.810</b>

**Fonte:** Elaborado a partir dos resultados do estudo do Déficit Habitacional no Brasil 2011-2012 e Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. FJP (2015, 2016).

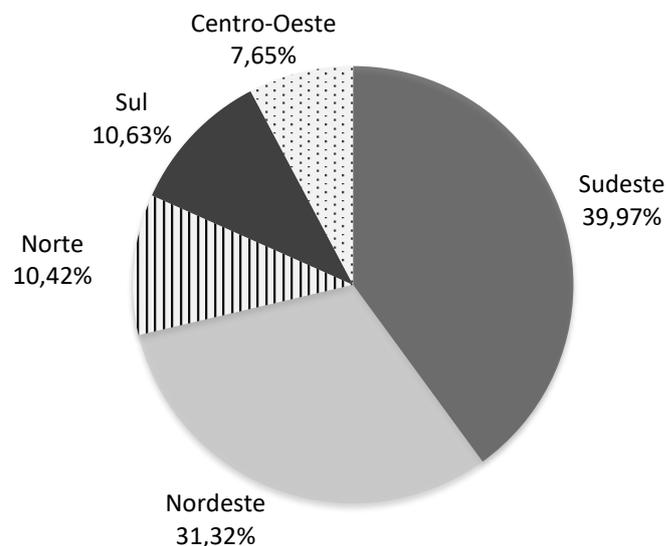
De acordo com os dados apresentados na **Tabela 1**, percebe-se o aumento do número do déficit habitacional urbano e a redução do déficit habitacional rural. Percebe-se ainda que nos três anos, a região sudeste detém a maior parcela do déficit habitacional total do país: 38,83%, 38,42% e 39,97% para os anos 2012, 2013 e 2014, respectivamente.

Os valores absolutos do déficit habitacional são bastante expressivos no estado de São Paulo, único estado em que a necessidade de novas unidades habitacionais ultrapassa um milhão de moradias, passando de 1,254 milhão em 2013 para 1,327 milhão de unidades em 2014. A segunda unidade de Federação com o maior déficit em 2014 foi Minas Gerais, com 529 mil unidades, seguida do Rio de Janeiro, com 460 mil unidades (**Figura 1**) (FJP, 2016).



**Figura 1.** Distribuição do déficit habitacional por unidade de Federação em 2014.  
**Fonte:** Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. FJP, 2016.

O déficit habitacional estimado para 2014 foi de 6.068.061 milhões de unidades habitacionais. Deste total, a maior concentração do déficit corresponde às regiões Sudeste e Nordeste, seguido das regiões Norte, Sul e Centro-Oeste (**Figura 2**) (FJP, 2016).



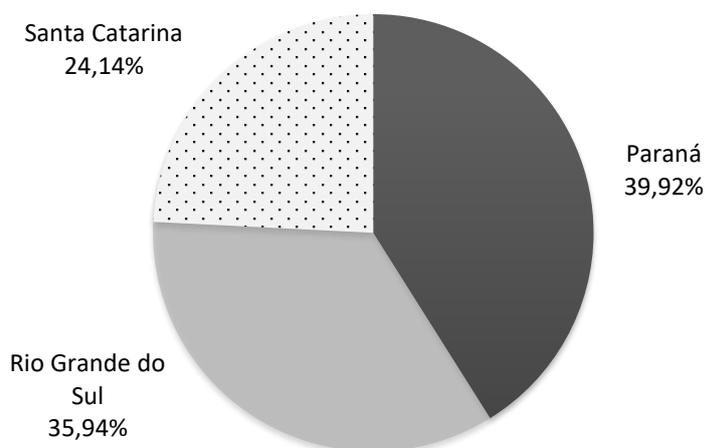
**Figura 2.** Distribuição do déficit habitacional total no Brasil em 2014.  
**Fonte:** Elaborado a partir dos resultados do estudo do Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. FJP, 2016.

Na região sul do Brasil, de acordo com o estudo “O Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014” (FJP, 2016), o déficit é de aproximadamente 645,2 mil unidades. O estado do Paraná corresponde ao maior déficit da região, seguido pelo estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde novamente a maior parcela do déficit habitacional está concentrada em áreas urbanas (**Tabela 2**) e (**Figura 3**) (FJP, 2016).

**Tabela 2.** Estimativa do déficit habitacional total por situação de domicílio na Região Sul do Brasil em 2014.

Especificação	Déficit Habitacional		
	Total	Urbano	Rural
<b>Região Sul</b>	645.189	608.807	36.382
<b>Paraná</b>	257.531	245.515	12.016
<b>Santa Catarina</b>	155.777	142.562	13.215
<b>Rio Grande do Sul</b>	231.881	220.730	11.151

**Fonte:** Elaborado a partir dos resultados do estudo do Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. FJP, 2016.



**Figura 3.** Distribuição do déficit habitacional na região sul do Brasil em 2014

**Fonte:** Elaborado a partir dos resultados do estudo Déficit Habitacional no Brasil 2013-2014. FJP, 2016.

Tendo em vista a necessidade de suprir a demanda de habitações enfrentada pelo Brasil, surgiram diversas medidas para redução do problema da habitação, que serão apresentadas na seguinte seção.

### 3.2. Programas Habitacionais Brasileiros

Segundo Bonduki (2011), a década de 1930 marca o surgimento da habitação social no Brasil, onde o clima político, econômico e cultural da época colocou em cena o tema da habitação social com uma força jamais vista anteriormente. Ainda segundo o autor, o problema da moradia emergiu como aspecto crucial das condições de vida do operariado, pois absorvia porcentagem significativa dos salários e influía no modo de vida e na formação ideológica dos trabalhadores.

A partir de 1930, houve modificações profundas na estrutura das cidades brasileiras, marcada pelo início da industrialização baseada no modelo de substituição de importações, acompanhada da urbanização (BOTEGA, 2008). De acordo com Nascimento e Braga (2009), a década de 1930 foi historicamente responsável pelas transformações das cidades brasileiras. Como consequência do desestímulo à produção agrícola e do estímulo e investimento na modernização do país, houve o aumento da migração da população rural para os centros urbanos em busca de emprego na economia industrial emergente. Nessa época houve um crescimento da população urbana, que passou de 11,3% em 1920, para 31,2% em 1940. Desde então, o Brasil viveu um grande surto de crescimento urbano, agravado pelo forte êxodo rural, onde em 1991 a população urbana passou para 74,8% (BOTEGA, 2008).

Tendo em vista a necessidade de suprir a demanda de habitações enfrentada pelo Brasil, surgiram diversas medidas para tentar solucionar o problema da habitação. O Instituto de Aposentadoria e Pensões – IAPs e a Fundação da Casa Popular (FCP) foram os primeiros órgãos federais que atuaram no setor da habitação social no Brasil, criados nas décadas de 1930 e 1940, respectivamente, e produziram um total de 142.127 unidades habitacionais (BONDUKI, 2011). As áreas que foram privilegiadas com o atendimento habitacional no período de vigência dos IAPs e da FCP foram as áreas de maior potencial econômico, concentração operária e mobilização política, ou seja, os estados do Rio de Janeiro (capital da República), São Paulo, Minas Gerais e Brasília e receberam aproximadamente três quartos do total das unidades habitacionais produzidas no Brasil (**Tabela 3**) (BONDUKI, 2011).

**Tabela 3.** Unidades habitacionais construídas pelos IAPs e FCP (1937-64).

Órgão	Rio de Janeiro	São Paulo	Minas Gerais	Brasília	Outros	Total
IAPs	47.691	25.428	8.377	7.315	35.214	123.995
FCP	3.993	2.959	4.248	1.520	5.412	18.132
<b>Total</b>	51.684	28.387	12.625	8.835	40.626	142.127

**Fonte:** Elaborado a partir de BONDUKI, 2011.

Bonduki (2011) comenta que a produção da FCP precisa ser melhor conhecida e ainda destaca a atuação quase nula da FCP em comparação com os IAPs, visto que a FCP foi o primeiro órgão federal que possuía atribuição exclusiva de solucionar problemas de habitação e produziu apenas 18.132 unidades, enquanto os IAPs que não tinham como principal atribuição solucionar problemas habitacionais, mas sim, a de proporcionar benefícios previdenciários e assistência médica, produziram um total de 123.995 unidades habitacionais.

Algumas das características dos projetos dos IAPs e da FCP são apresentadas no **Quadro 1** e nas **Figuras 4 e 5**. A **Figura 4** é referente ao Conjunto Residencial Vila Guiomar, no qual foram construídas 1.411 unidades por um dos IAPs, o Instituto de Aposentadoria e Pensão dos Industriários (IAPI) na Cidade de Santo André-SP, na década de 1940, onde se destaca o uso de blocos laminares sobre pilotis, algumas vezes transformados em garagem (BONDUKI, 2011). A **Figura 5** é referente ao projeto do Conjunto Residencial Deodoro, no qual foram construídas 1.314 unidades pela FCP, no Rio de Janeiro, na década de 1940, onde se destaca a articulação de blocos serpenteantes com laminares (BONDUKI, 2011).



**Figura 4.** Blocos laminares sobre pilotis, Conjunto Residencial Vila Guiomar, Santo André-SP, década de 50, obra do IAPI.  
**Fonte:** BONDUKI, 2011.



**Figura 5.** Blocos serpenteantes e laminares, Conjunto Residencial de Deodoro, Rio de Janeiro, década de 50, obra da FCP.  
**Fonte:** BONDUKI, 2011.

**Quadro 1. Características dos projetos da FCP e IAPs.**

Órgão atuante na produção de habitação social	Características
Fundação da Casa Popular	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Blocos habitacionais serpenteantes e laminares</li> </ul>
Instituto de Aposentadoria e Pensões	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Três tipos de construção: Tipo A: geminadas; Tipo B: cortiço; Tipo C: em série;</li> <li>• Construção de unidades isoladas e/ou semi-isoladas e posterior construção de conjuntos de edifícios;</li> <li>• Preocupação com a racionalização da construção, possibilitada pela inédita (na época) utilização dos blocos de concreto;</li> <li>• Influência da arquitetura alemã: economia e racionalização, blocos laminares de três ou quatro pavimentos, com pouca ou nenhuma ornamentação atestam esta influência;</li> <li>• Valorização do espaço público e uso intenso da vegetação como elemento importante do projeto;</li> <li>• Uso de elementos vazados, circulação vertical e blocos laminares sobre pilotis;</li> <li>• Blocos de apartamentos laminares com uma implantação moderna, traçado de ruas curvas;</li> <li>• Princípios da <i>Unité d'Habitation</i>: Teto-jardim, pilotis, apartamento duplex, equipamentos coletivos;</li> <li>• Casas individuais, casas sobrepostas, blocos de apartamento;</li> </ul>

**Fonte:** Elaborado a partir de BONDUKI (2011).

No ano de 1963 foi estabelecido o Plano de Assistência Habitacional (PAH) com o intuito de construir 100.000 unidades em 18 meses e planejou-se o estabelecimento do Instituto Brasileiro de Habitação (IBH) como um substituto para a FCP. Porém, tanto a meta de produção habitacional como o estabelecimento do IBH não foram medidas bem-sucedidas (WERNA et al, 2001).

Em 1964 foi estabelecido o Banco Nacional de Habitação (BNH), que tinha como meta instituir uma forte presença estatal no processo de provisão habitacional. O BNH era o órgão gestor do Fundo de Garantia por Tempo de Serviço (FGTS) (destinado a financiar a produção de moradias para a população de baixa renda), e órgão regulador do Sistema Brasileiro de Poupança e Empréstimo (SBPE), subsistemas que compunham o Sistema de Financeiro da Habitação (SFH) (WERNA et al, 2001).

Segundo Bonduki (2008), nos vinte e dois anos de funcionamento do BNH, o SFH financiou a construção de 4,3 milhões de unidades novas, onde 2,4 unidades foram financiadas com recursos do FGTS, destinado o setor popular, e 1,9 milhões com recursos do SBPE (para o mercado de habitação para a classe média). Após a extinção do BNH em 1986, a Caixa econômica Federal (CEF) assumiu seus atributos (WERNA et al, 2001).

Após a incorporação do BNH pela CEF em 1986, esta assumiu a condição de maior agente nacional de financiamento da casa própria e de importante financiadora do

desenvolvimento urbano, especialmente do saneamento básico. Com a extinção do BNH, a CEF tornou-se o principal agente do SBPE e administradora do FGTS e de outros fundos do SFH (CEF, 2016a).

Atualmente, o programa Minha Casa Minha Vida (MCMV) é o principal programa de combate ao déficit habitacional existente no Brasil. Segundo a CEF (2016a), o MCMV é uma iniciativa do Governo Federal e possui duas modalidades: habitação urbana e habitações rurais. A primeira modalidade oferece condições para o financiamento de moradias nas áreas urbanas para famílias de baixa renda e possui parceria com estados, municípios empresas e entidades sem fins lucrativos. No âmbito da habitação rural está inserido o Programa Nacional de Habitação Rural (PNHR) que foi criado com o objetivo de possibilitar aos agricultores familiares, trabalhadores rurais e comunidades tradicionais o acesso à moradia digna no campo, por meio da construção de uma casa nova, reforma, ampliação ou conclusão de um imóvel já existente. Alguns detalhes do financiamento do Programa são apresentados na **Tabela 4**.

**Tabela 4.** Detalhes do Programa Minha Casa Minha Vida.

Programa Minha Casa Minha Vida		
Minha Casa Minha Vida	Faixa de Renda	Condições
<b>Modalidade Urbana</b>	Famílias com renda até R\$ 1.800,00;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A prestação não pode ser superior a 30% da renda familiar mensal;</li> </ul>
	Famílias com renda até R\$ 6.500,00;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A renda familiar bruta deve ser até R\$ 6.500,00 por mês;</li> <li>• O imóvel deve ser utilizado para a moradia do beneficiado;</li> </ul>
<b>Modalidade Rural</b>	Grupo I: Famílias com renda até R\$ 15.000,00 por ano;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Situar-se na área rural do município;</li> </ul>
	Grupo II: Famílias com renda de R\$ 15.000,01 até R\$ 30.000,00 por ano;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Medir até 4 módulos fiscais, exceto áreas indígenas e comunidades quilombolas;</li> </ul>
	Grupo III: Famílias com renda de R\$ 30.000,01 até R\$ 60.000,00 por ano;	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possuir vias de acesso, soluções para abastecimento de água, esgoto sanitário e energia elétrica;</li> <li>• As glebas dos beneficiários do grupo podem situar-se no máximo em três municípios</li> </ul>

**Fonte:** Elaborado a partir de informações do site da CEF (2016d).

A **Figuras 6** apresenta infográficos que contém informações sobre a quantidade de brasileiros beneficiados pelo programa MCMV até setembro de 2015.



(a)



(b)

**Figura 6a-b.** Dados do MCMV até setembro de 2015.  
**Fonte:** CEF, 2016b, 2016c.

A **Tabela 5** apresenta um breve resumo sobre a criação, extinção e a Produção habitacional dos principais órgãos, instituições e programas que atuaram/atuam no combate do déficit habitacional no Brasil.

**Tabela 5.** Agentes de combate ao déficit habitacional no Brasil: breve histórico.

Órgão	Criação	Extinção	Produção habitacional
IAPs	Década de 30	Década de 60	123.995
FCP	1946	Década de 60	18.132
BNH/SFH	1964	1986	Financiamento de 4,3 milhões de moradias
CEF/ Minha Casa Minha Vida	2009	Em vigência	2.3 milhões

**Fonte:** Elaborado a partir de BONDUKI (2008, 2011); CEF (2016b); WERNA et al (2001).

A revista Construção Mercado Pini, publicou em Julho de 2012 uma notícia intitulada: “**Minha Casa na Mira**”. A notícia relata a queixa de proprietários de imóveis que integram o programa Minha Casa Minha Vida, sobre vícios construtivos e a baixa qualidade das unidades recém-entregues. Como exemplo, tem-se o conjunto residencial Nova Conceição, em Feira de Santana-BA, que apresentou problemas de infiltrações apenas seis meses após a entrega e também, o condomínio Ouro Verde, em Padre Bernardo-GO, que apresentou problemas

semelhantes. Já no condomínio Alto do Bosque, em Rio Claro-SP, as queixas foram sobre paredes e pórticos de entrada tortos, infiltrações em paredes e calhas, cômodos com medidas inferiores às da planta apresentadas no momento de venda, lajes com trincas, distorções nos requadros das esquadrias, entre outros. No caso do condomínio Alto do Bosque, em Rio Claro-SP, os problemas construtivos motivaram a abertura de uma ação civil pública pelo Ministério Federal (NAKAMURA, 2012).

Diante do exposto e considerando a importância do sistema construtivo para a execução de habitação de interesse social, bem como a necessidade de inovação tecnológica, no seguinte capítulo será abordado especificamente, dentre os vários sistemas construtivos empregados atualmente na construção civil, o sistema construtivo em *Wood Frame*, que é um sistema que vem conquistando espaço no Brasil e já está sendo utilizado na produção de habitações de interesse social no país.

## **4** SISTEMA *WOOD FRAME* NA PRODUÇÃO DE HABITAÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo mostrar uma visão geral do sistema construtivo *Wood Frame*, como alternativa para produção de habitação no Brasil, apresentando suas características e o seu uso recente na produção de habitação social no país.

### **4.1. Sistema Construtivo *Wood Frame***

De acordo com a *Canada Mortgage and Housing Corporation* (CMHC, 2014), o sistema *Wood Frame* tem sido a opção escolhida para a construção de milhões de casas na América do Norte. Nos Estados Unidos especificamente, o *Wood Frame* é o método predominante na construção de casas e apartamentos e cada vez mais está sendo utilizado em construções comerciais e industriais (AWC, 2001).

O *Wood Frame* consiste em um sistema construtivo composto por elementos estruturais em madeira e fechamentos que promovem rigidez à estrutura, tornando-a capaz de resistir às cargas sísmicas, cargas de vento, neve, carga de construção e ocupação, além de proporcionar espaço para isolamento, e uma estrutura para suportar acabamento interior e componentes exteriores (CMHC, 2014). Trata-se de um sistema construtivo industrializado, estruturado em perfis de madeira tratada, leve, durável, que apresenta rápida execução e redução de desperdícios, além de elevado controle de qualidade (MOLINA, CALIL Jr, 2010). A **Figura 7** apresenta o esquema de uma residência no sistema *Wood Frame*.



**Figura 7.** Esquema de habitação em Wood Frame.  
**Fonte:** FERREIRA, 2013.

Quando bem projetado e construído, o sistema apresenta durabilidade, facilidade e rapidez de construção e reforma. Por ser construído em madeira e a mesma ser um isolante, oferece redução de custos com aquecimento e arrefecimento, além de ser adaptável a diferentes tipos de clima, que podem variar de quente e úmido, a climas extremamente frios, dentre outras características. Quanto ao desempenho, como qualquer outro sistema construtivo, o *Wood Frame* requer cuidados razoáveis em sua concepção e construção, para que possa proporcionar abrigo por um longo tempo, conforto e segurança (CMHC, 2014).

Por se tratar de um sistema construtivo industrializado, a construção em *Wood Frame* reduz significativamente os desperdícios, que por sua vez são altamente impactantes nos sistemas tradicionais. Há o ganho de produtividade vinculado a uma obra limpa e seca e ocorre a facilidade de manuseio dos elementos estruturais e de fechamento, demandando menos esforços dos operários. Além disso, o sistema *Wood Frame* permite a execução de qualquer tipo de projeto, desde casas populares à construções com alto padrão de acabamento (MOLINA, CALIL Jr, 2010).

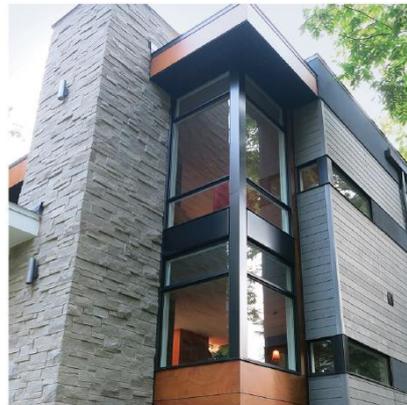
Segundo a *American Wood Council* (AWC, 2001), a construção em madeira é facilmente adaptável ao tradicional, contemporâneo e à maioria dos estilos de construção futuristas. Suas possibilidades arquitetônicas são ilimitadas. A **Figura 8** apresenta uma construção em *Wood Frame* em fase de execução, onde é possível ver a estrutura do telhado em madeira e o fechamento da estrutura em chapas de *Oriented Strad Board* (OSB).

A **Figura 9** apresenta um detalhe em alto padrão em uma construção utilizando o *Wood Frame*, mostrando uma das diversas possibilidades arquitetônicas desse sistema.



**Figura 8.** Construção em “*Wood Frame*” na cidade de Banff no Canadá.

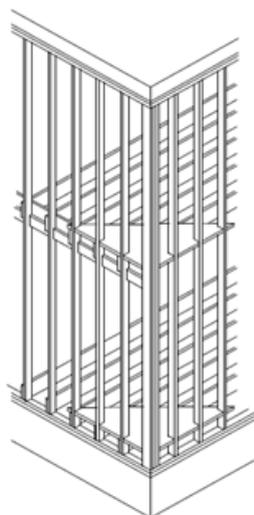
**Fonte:** LUKIANTCHUKI, 2015.



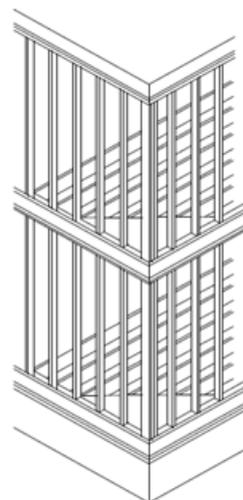
**Figura 9.** Detalhe em alto padrão na construção em “*Wood Frame*” no Canadá.

**Fonte:** CMHC, 2014

A construção em *Wood Frame* pode ser realizada através de dois métodos: o *Balloon Frame* (**Figura 10**) e o *Platform Frame* (**Figura 11**). No método *Balloon Frame* os perfis de madeira que conformam os painéis são contínuos, passando pela plataforma dos pisos até a cobertura. Este método era comum no século XX, porém a necessidade de perfis mais longos e a dificuldade para levantar a casa, reduziram a popularidade desse sistema. O *Platform Frame* é o método mais comum para a construção de casas. Esse método fornece uma superfície de trabalho em cada andar e é facilmente adaptável a vários métodos de pré-fabricação. A plataforma de piso é primeiramente construída e as paredes de cada andar são adicionadas em cada piso. Nesse método a prática mais comum é montar os painéis de parede sobre chão/piso e levantar a unidade inteira no local determinado (AWC 2001; CMHC, 2014).



**Figura 10.** Sistema Balloon Framing.  
**Fonte:** CONSULSTEEL, 2008



**Figura 11.** Sistema Platform Framing.  
**Fonte:** CONSULSTEEL, 2008

No Brasil, o *Wood Frame* insere-se como um sistema inovador. De acordo com a Diretriz SINAT nº 005 - Revisão 01 – Diretriz para Avaliação Técnica de sistemas construtivos estruturados em peças de madeira maciça serrada, com fechamentos em chapas delgadas (Sistemas leves tipo “*Light Wood Framing*”), sistemas ou produtos inovadores são aqueles que não possuem norma técnica brasileira para a análise de desempenho e que não tenham tradição de uso no território nacional, ao contrário dos sistemas convencionais, que além de terem tradição de uso, os seus componentes possuem normas técnicas brasileiras BRASIL (2016).

Pelo fato do *Wood Frame* ainda não ser normalizado no Brasil, o Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT), que é destinado a avaliar produtos não abrangidos por normas técnicas prescritivas, apresenta uma série de diretrizes a serem atendidas na utilização do *Wood Frame*, desde a etapa de caracterização do produto ao controle de qualidade da montagem, através da Diretriz SINAT nº 005. Essa diretriz tem o campo de aplicação destinado a unidades habitacionais unifamiliares (casas térreas e sobrados), isoladas e geminadas (BRASIL, 2016).

De forma geral, os Requisitos e critérios de desempenho<sup>1</sup> apresentados na Diretriz SINAT nº 005, que devem ser atendidos seguindo as normas regulamentadoras brasileiras pertinentes indicadas no documento referido, são: desempenho estrutural, segurança contra incêndio, estanqueidade à água, desempenho térmico, desempenho acústico, durabilidade e manutenibilidade (BRASIL, 2016).

<sup>1</sup> Para maiores detalhes sobre, consultar em: [http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php)

Quanto ao desempenho térmico dos painéis de vedação, objeto de estudo desse trabalho, a Diretriz SINAT nº 005 recomenda que a edificação habitacional atenda aos requisitos de desempenho térmico considerando as zonas bioclimáticas definidas na NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), apresentando valores de transmitância térmica e capacidade térmica das paredes externas conforme definido na NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) (ver seção 5.4).

Ainda segundo recomendações da Diretriz SINAT nº 005, o controle da qualidade do sistema deve ser realizado na fase de recebimento, produção e montagem do produto na unidade habitacional. A produção pode ocorrer tanto no canteiro de obras, quanto em unidades industriais. Após a finalização da montagem da unidade habitacional, é imprescindível a realização de uma inspeção visual do produto montado, de forma a identificar e corrigir a existência de eventuais não conformidades que possam causar prejuízos ao desempenho do produto (BRASIL, 2016).

De acordo com a matéria publicada na Revista Construção Mercado em outubro de 2016, intitulada: “Sistema *Wood Frame* se prepara para avançar no mercado brasileiro”, o cenário da falta de normalização desse sistema começou a mudar com o surgimento da Comissão de Estudo de *Wood Frame* no âmbito da ABNT (CE-002: 126.011) em junho de 2016, de forma a possibilitar que o sistema seja consolidado em todo o Brasil, pois, apesar de ainda ter uma representatividade pequena no mercado de construção (aproximadamente 0,5%), este sistema já vem sendo empregado no Brasil em centenas de casas do programa MCMV, imóveis de alto padrão, conjuntos residenciais, escolas, escritórios e demais construções (HOLTZ, 2016).

#### **4.2. Uso do *Wood Frame* na Produção de Habitação de Interesse Social no Brasil**

O sistema em *Wood Frame* vem conquistando espaço no Brasil no que diz respeito à produção de habitação social, principalmente na região sul do país onde o primeiro residencial no âmbito do programa Minha Casa Minha Vida foi construído.

A matéria publicada no site da Revista Construção Mercado em setembro de 2013, intitulada “*MCMV de madeira*” e a matéria na Revista Equipe de Obra, publicada em agosto de 2013, intitulada “*Habitação popular em madeira*” relatam a construção das primeiras moradias utilizando o sistema em *Wood Frame* no âmbito do programa Minha Casa Minha Vida entregue em junho de 2014, que foi construído com tecnologia Tecverde em parceria

com a Construtora Roberto Ferreira. Trata-se do Residencial Haragano, em Pelotas no Rio Grande do Sul, com 280 unidades de 45m<sup>2</sup>, das quais 270 são sobrados e 10 são casas térreas, com projeto de acessibilidade. As empresas responsáveis pelo empreendimento relataram que para a realização do mesmo e para a obtenção do financiamento da CEF, o sistema foi submetido a testes que comprovassem sua conformidade às diretrizes do SINAT do Ministério das Cidades. Ainda de acordo com as empresas, todas as unidades atendem aos requisitos da Norma de Desempenho – (NBR 15575). O sistema precisou ser adaptado ao Brasil e passou por ensaios de desempenho contra fogo, desempenho térmico e acústico, entre outros. Um dado relevante é que as empresas realizaram um levantamento com base no projeto do Residencial Haragano e nos custos aproximados de residências similares em alvenaria. Esse comparativo levou em conta residências de 44,3 m<sup>2</sup>, com projeto arquitetônico semelhante e como resultado obtiveram que o *Wood Frame* permitiu baratear o projeto em até 15% (FERREIRA, 2013; GIRIBOLA, 2013). As **Figuras 12 e 13** apresentam o detalhe da montagem de uma das unidades habitacionais do residencial Haragano e algumas das unidades finalizadas.



**Figura 12.** Montagem de unidade habitacional, residencial Haragano, em Pelotas-RS.

**Fonte:** GIRIBOLA, 2013



**Figura 13.** Unidades habitacionais finalizadas, residencial Haragano, em Pelotas-RS.

**Fonte:** FERREIRA, 2013

A matéria publicada no site da revista *Téchne* em março de 2015, intitulada “*Minha Casa Minha Vida entrega o primeiro residencial do Paraná construído com Wood Frame*”, está diretamente relacionada com o tema do presente trabalho: construção de habitações de interesse social com o sistema *Wood Frame* no Paraná. A matéria trata da construção do condomínio residencial Moradas Nilo, que possui 66 unidades residenciais unifamiliares de 41,73 m<sup>2</sup> e que foi construído pela empresa Tecverde, em Curitiba-PR, e entregue pelo Governo Federal no dia 23 de março de 2015. Alguns dados relevantes dessa notícia é que

a construção do condomínio durou cerca da 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. Além disso, o sistema permite que as paredes sejam montadas com painéis de madeira autoclavada para garantir a proteção contra cupins e umidade. As casas têm garantia de dez anos e média de durabilidade de 50 anos (AMORIM, 2015). As **Figuras 14 e 15** apresentam o detalhe da montagem de uma das 66 unidades habitacionais do residencial Moradias Nilo e algumas das unidades finalizadas.



**Figura 14.** Montagem de unidade habitacional. Condomínio Moradias Nilo, Curitiba-PR.  
**Fonte:** AMORIM, 2015.



**Figura 15.** Unidades habitacionais finalizadas. Condomínio Moradias Nilo, Curitiba-PR.  
**Fonte:** AMORIM, 2015.

Em agosto de 2016 a empresa Tecverde lançou o 1º prédio em *Wood Frame* no Brasil, na cidade de Araucária, região metropolitana de Curitiba-PR. De acordo com notícia publicada no site da empresa intitulada “Tecverde apresenta 1º prédio construído em tecnologia sustentável industrializada no Brasil”, o novo empreendimento consiste em um prédio de três pavimentos montado em 64 horas, realizado em parceria da Tecverde com a CRM Construtora. Vários profissionais, empresários e entidades do setor da construção visitaram a obra e puderam acompanhar a montagem em tempo real do último pavimento do prédio (TECVERDE, 2016a). As **figuras 16 e 17** apresentam a montagem do prédio e o mesmo com acabamento externo.



**Figura 16.** Primeiro prédio em *Wood Frame* no Brasil.

**Fonte:** TECVERDE, 2016a.

**Figura 17.** Face externa do prédio em *Wood Frame*.

**Fonte:** TECVERDE, 2016b.

Além dos projetos apresentados anteriormente, na **Tabela 6** apresentam-se demais projetos finalizados e/ou em andamento em *Wood Frame* no âmbito do programa Minha Casa Minha Vida.

**Tabela 6.** Exemplos de unidades habitacionais em *Wood Frame* no âmbito do MCMV.

#### **Residencial Terra Nova**

Localização: São Mateus do Sul - PR

Unidades: 100 unidades

Área: 43m<sup>2</sup>

Tipologia: térrea

Conclusão: em andamento



#### **Residencial Castelo de São Jorge**

Localização: Dourados - MS

Unidades: 213 1ª fase e 230 na 2ª fase

Área: 42,8m<sup>2</sup>

Tipologia: térrea

Conclusão: em andamento



### Loteamento Sapucaia

Localização: Sapucaia - RS

Unidades: 114 unidades

Área: 42,8m<sup>2</sup>

Tipologia: térrea

Conclusão: 2015



### Residencial Vivendas do Taquaral

Localização: Maricá - RJ

Unidades: 25 unidades

Área: 60m<sup>2</sup>

Tipologia: térrea

Conclusão: 2015



### Loteamento Santo Antônio do Palmital

Localização: Rio Bom - PR

Unidades: 23 unidades

Área: 43m<sup>2</sup>

Tipologia: térrea

Conclusão: 2015



**Fonte:** Elaborado a partir de TECVERDE (2016b).

Diante do exposto, decidiu-se estudar o *Wood Frame* de forma a verificar se esse sistema é uma opção viável para a produção de habitação social na cidade de Foz do Iguaçu-PR, tendo em vista principalmente as características climáticas. Para tal, foi estudado o desempenho térmico desse sistema para as condições climáticas de Foz do Iguaçu, através de simulações computacionais e com as informações e diretrizes da NBR 15220 (ABNT, 2005) e NBR 15575 (ABNT, 2013).

## **5** DESEMPENHO TÉRMICO DAS VEDAÇÕES VERTICAIS

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar as considerações para a avaliação do desempenho térmico das vedações verticais. Na seção 5.1 é apresentado conceitos de transmissão de calor nas vedações verticais; na seção 5.2 as propriedades térmicas dos materiais; na seção 5.3 o Clima de Foz do Iguaçu e as Recomendações em Relação à Vedações Verticais; e finalmente, na seção 5.4 a Análise Climática x Desempenho Térmico no contexto da NBR 15575-1 e NBR 15575-4.

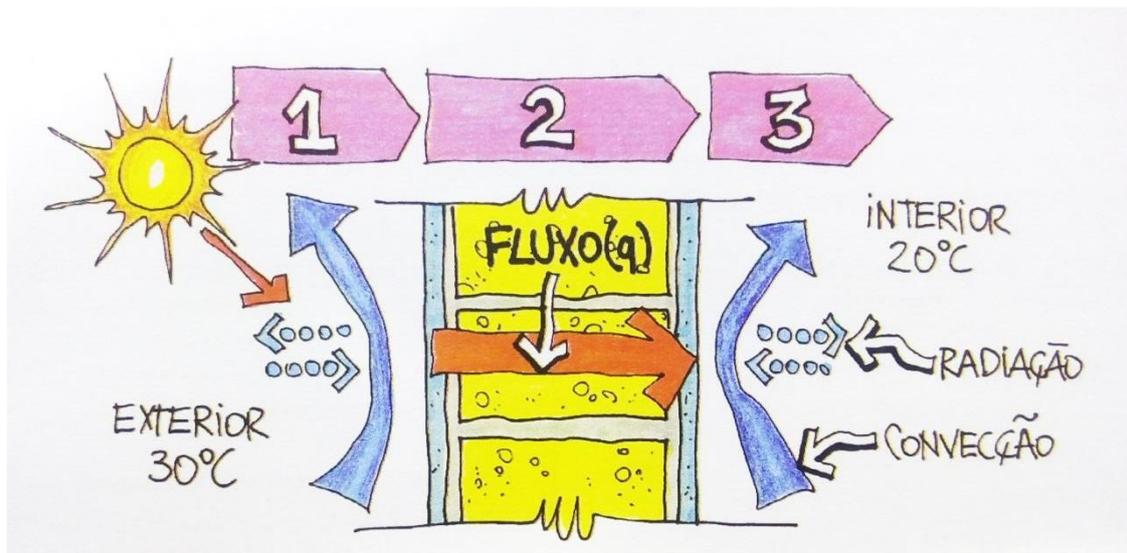
### **5.1. Transmissão de Calor nas Vedações Verticais**

Entende-se por transmissão de calor o conjunto de fenômenos que caracterizam a passagem de calor de uma região para outra, de forma que, há a necessidade de uma diferença de temperatura entre duas regiões e o fluxo térmico sempre se verifica no sentido das temperaturas decrescentes (COSTA, 1991). Quando não há uma diferença de temperatura entre dois corpos, ou seja, se as temperaturas dos corpos forem iguais, não há transmissão de calor e diz-se que os corpos estão em equilíbrio térmico (RIVERO, 1985).

A transmissão do calor pode ocorrer segundo três formas distintas: condução, convecção e radiação. A transferência de calor por condução se dá pelo transporte de energia térmica em um meio sólido, devido ao gradiente de temperatura. Já a transferência de calor por convecção ocorre entre um fluido em movimento e uma superfície quando estes se encontram a diferentes temperaturas. Finalmente, para que ocorra a transferência de calor por radiação, o calor emitido depende da temperatura superficial do material e ocorre no vácuo, ou seja, não precisa de um meio material para realizar a troca térmica (ORDENES; LAMBERTS; GÜTHS, 2008).

Em uma edificação, a radiação solar é a principal responsável pelos ganhos térmicos, já que a parcela da radiação transmitida para o interior atuará nas condições de conforto de forma instantânea. Como os materiais se comportam de modo distinto diante da radiação solar, convém diferenciar os fechamentos em duas formas: fechamentos transparentes (janelas, claraboias, etc.) e fechamentos opacos (paredes, coberturas, piso), onde a principal diferença entre eles é a sua capacidade ou incapacidade de transmitir a radiação solar para o ambiente interno. Para melhor entendimento da transmissão de calor em fechamentos

opacos verticais, pode-se dividir a transferência de calor nesse tipo de fechamento em três fases: Fase 1: troca de calor com o meio exterior, Fase 2: condução através do fechamento e Fase 3: troca de calor com o meio interior (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A **Figura 18** apresenta de forma bem ilustrativa a ocorrência da transmissão de calor em um fechamento opaco. O **Quadro 2** apresenta um resumo sobre a transmissão de calor nas diferentes fases citadas anteriormente.



**Figura 18.** Fases da transmissão de calor em um fechamento opaco vertical.  
**Fonte:** LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014).

**Quadro 2.** Fases da transmissão de calor em um fechamento opaco vertical.

Fase 1 Troca de calor com o meio exterior	Fase 2 Condução através do fechamento	Fase 3 Troca de calor com o meio interior
<ul style="list-style-type: none"> <li>O fechamento recebe calor através do meio por convecção e radiação;</li> <li>O incremento de temperatura nessa superfície depende da sua Resistência superficial externa (<math>R_{se}</math>);</li> <li>Parte da radiação incidente no fechamento é refletida e outra absorvida, de acordo com a refletividade e a absorvância do material.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nessa fase, a transmissão de calor ocorre por condução;</li> <li>A intensidade do fluxo de calor pelo material depende da condutividade térmica (<math>\lambda</math>) e da espessura do fechamento (<math>e</math>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nessa fase a transmissão de calor volta a ser por convecção e radiação;</li> <li>As perdas de calor por convecção dependem da resistência superficial interna do fechamento (<math>R_{si}</math>);</li> <li>As perdas de calor por radiação dependem da emissividade do material.</li> </ul>

**Fonte:** Elaborado a partir de LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA (2014).

Em um fechamento opaco, as trocas de calor podem ser reduzidas consideravelmente através do emprego de materiais com condutividades térmicas mais baixas, como também,

construindo um fechamento com múltiplas camadas, em uma delas pode ser uma câmara de ar. Dentro da câmara as trocas térmicas são por convecção e radiação, em vez de condução. A convecção depende da inclinação do fechamento e da direção do fluxo, e por sua vez, a troca térmica por radiação depende da emissividade da superfície do material em contato com a camada de ar (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Na especificação de um fechamento, o objetivo principal é evitar perdas de calor excessivas no inverno e ganhos elevados no verão. A densidade de fluxo de calor ou fluxo térmico ( $q$ ), que representa a taxa de fluxo de calor por unidade de área de um corpo ou espaço [ $W/m^2$ ], pode ser determinada pela **equação 1**, considerando o inverno, onde a temperatura exterior é inferior à temperatura interior, e também pela **equação 2**, considerando o verão, onde a temperatura exterior é superior à temperatura interior e a incidência do sol nos fechamentos opacos pode incrementar o fluxo de calor para o interior do ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

$$q = U \cdot \Delta t \quad (1) \qquad q = U \cdot (\alpha \cdot I \cdot R_{se}) \quad (2)$$

Onde:

$q$  = Densidade de fluxo de calor [ $\frac{W}{m^2}$ ];

$U$  = Transmitância térmica [ $\frac{W}{m^2K}$ ];

$\Delta t$  = Diferença entre as temperaturas interior e exterior [ $K$ ].

Onde:

$q$  = Densidade de fluxo de calor [ $\frac{W}{m^2}$ ];

$U$  = Transmitância térmica [ $\frac{W}{m^2K}$ ];

$\alpha$  = Absortância da superfície externa do fechamento;

$I$  = Radiação solar [ $\frac{W}{m^2}$ ];

$R_{se}$  = Resistência superficial externa [ $\frac{m^2K}{W}$ ];

O fluxo de calor ( $Q$ ) representa a quantidade de energia térmica em watts [ $W$ ] que atravessa um fechamento de um ambiente e é determinado pela **equação 3**. Os valores do fluxo térmico indicam a quantidade de calor que entra ou sai de um ambiente por condução nos fechamentos (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

$$Q = q \cdot A \quad (3)$$

Onde:

$Q$  = Fluxo de calor [ $W$ ];

$q$  = Densidade de fluxo de calor [ $\frac{W}{m^2}$ ];

$A$  = Área do fechamento [ $m^2$ ].

## 5.2. Propriedades Térmicas dos Materiais

Neste item serão apresentadas as definições, valores e modo de cálculo das seguintes propriedades térmicas: absorvância à radiação solar ( $\alpha$ ), emissividade ( $\epsilon$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ), capacidade térmica ( $C_T$ ), resistência térmica ( $R$ ), transmitância térmica ( $U$ ), atraso térmico ( $\varphi$ ) e fator de ganho solar ( $FS_o$ ).

A absorvância à radiação solar ( $\alpha$ ) é o quociente da taxa de radiação solar absorvida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente sobre a mesma superfície (ABNT, 2013a). A principal determinante dessa característica é a cor superficial do material, onde, os materiais escuros absorvem a maior parte da radiação solar incidente do que materiais claros (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A emissividade ( $\epsilon$ ) representa a quantidade de energia térmica emitida por unidade de tempo e está relacionada à camada superficial do material emissor. Para superfícies refletoras (materiais metálicos) tem-se  $\epsilon < 0,2$  e para superfícies não-refletoras tem-se  $\epsilon > 0,2$  (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A **Tabela 7** apresenta valores da absorvância para a radiação solar e emissividade para radiação a temperaturas comuns de alguns materiais construtivos e de algumas cores.

**Tabela 7.** Valores de absorvância ( $\alpha$ ) e emissividade ( $\epsilon$ ).

Superfície		Absorvância ( $\alpha$ )	Emissividade ( $\epsilon$ )
Chapa de aço galvanizada (nova e brilhante)		0,25	0,25
Concreto Aparente e Tijolo Aparente		0,65 / 0,80	0,85 / 0,95
Revestimento asfáltico		0,85 / 0,98	0,90 / 0,98
Vidro incolor		0,06 / 0,25	0,84
Pintura	Branca	0,20	0,90
	Amarela	0,30	0,90
	Vermelha	0,74	0,90
	Preta	0,97	0,90

**Fonte:** Adaptado de (ABNT, 2005).

A condutividade térmica ( $\lambda$ ) representa a capacidade do material de conduzir maior ou menor quantidade de calor por unidade de tempo e depende da densidade do material, logo, quanto menor for a densidade do material, menor será a sua condutividade térmica (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

A capacidade térmica ( $C_T$ ) é a quantidade de calor necessária para variar em uma unidade a temperatura de um sistema (ABNT, 2013a). A capacidade térmica de um componente plano constituído por camadas homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela **equação 4a** (ABNT, 2005). Essa propriedade representa a capacidade do material em reter calor e, através do seu valor, pode-se avaliar o quanto determinado material pode contribuir em termos de inércia térmica para um ambiente (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

$$C_T = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot R_i \cdot c_i \cdot \rho_i = \sum_{i=1}^n e_i \cdot c_i \cdot \rho_i \quad (4a)$$

Onde:

$C_T$  = capacidade térmica  $\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$ ;

$e_i$  = espessura da camada  $i$  [m];

$\lambda_i$  = Condutividade térmica do material da camada  $i$   $\left[ \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$ ;

$c_i$  = Calor específico do material da camada  $i$   $\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right]$ ;

$R_i$  = Resistência térmica da camada  $i$   $\left[ \frac{\text{m}^2 \cdot \text{K}}{\text{W}} \right]$ ;

$\rho_i$  = Densidade de massa aparente do material da camada  $i$   $\left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right]$ ;

A capacidade térmica ( $C_T$ ) de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela **equação 4a** (ABNT, 2005).

$$C_T = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}} + \dots + \frac{A_n}{C_{Tn}}} \quad (4b)$$

Onde:

$C_{Ta}, C_{Tb}, \dots, C_{Tn}$  = Capacidades térmicas dos componentes para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão 4a;

$A_a, A_b, \dots, A_n$  = Área de cada seção.

A **Tabela 8** apresenta valores da condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico de alguns materiais indicados na NBR 15220 (ABNT, 2005).

**Tabela 8.** Condutividade térmica, densidade de massa aparente e calor específico.

Material	Densidade de Massa Aparente ( $\rho$ )	Condutividade Térmica ( $\lambda$ )	Calor específico (c)
	$\left[\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right]$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$	$\left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right]$
Argamassa comum	1800-2100	1,15	1,00
Concreto normal com agregados de pedra	2200-2400	1,75	1,00
Placa de gesso; gesso cartonado	750-1000	0,35	0,84
Lã de rocha	20-200	0,045	0,75
Alumínio	2700	230	0,88
Vidro Comum	2500	1,00	0,84

**Fonte:** Adaptado de ABNT (2005).

A resistência térmica (R) representa a capacidade de um material resistir à passagem do calor. A Resistência térmica de uma camada homogênea de material sólido é determinada pela **equação 5** (ABNT, 2005). Quanto maior for a espessura do material, maior será a sua resistência térmica, da mesma forma que, quanto maior for a condutividade térmica do material, menor será a sua resistência térmica.

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad (5)$$

Onde:

R= Resistência térmica de um material  $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$ ;

e= Espessura do material [m];

$\lambda$  = Condutividade térmica do material  $\left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}\right]$ .

A Resistência térmica de superfície a superfície ( $R_t$ ) de um componente plano constituído de camadas homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor é determinada pela **equação 6a** (ABNT, 2005).

$$R_t = R_{t1} + R_{t2} + \dots + R_{tn} + R_{ar1} + R_{ar2} + \dots + R_{arn} \quad (6a)$$

Onde:

$R_t$  = Resistência térmica de superfície a superfície  $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$ ;

$R_{t1}, R_{t2}, \dots, R_{tn}$  = Resistências térmicas das n camadas homogêneas determinadas pela equação 5;

$R_{ar1}, R_{ar2}, \dots, R_{ar}$  = Resistências das n camadas de ar obtidas na tabela 3.

A Resistência térmica de superfície a superfície ( $R_t$ ) de um componente plano constituído de camadas homogêneas e não homogêneas, perpendiculares ao fluxo de calor, é determinada pela **equação 6b** (ABNT, 2005).

$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (6b)$$

Onde:

$R_a, R_b, \dots, R_n$  = Resistências térmicas de superfície à superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão 6a;

$A_a, A_b, \dots, A_n$  = Área de cada seção.

A Resistência térmica de uma câmara de ar não ventilada ( $R_{ar}$ ) pode ser obtida através da ABNT NBR 15220-2:2005. A **Tabela 9** apresenta valores da resistência térmica de ar não ventiladas, válidos para um temperatura média da camada entre 0°C e 20°C e com uma diferença de temperatura entre as superfícies limitantes menor do que 15°C (ABNT, 2005).

**Tabela 9.** Resistência térmica de ar não ventiladas.

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar [cm]	Direção do fluxo de calor		
		$R_{ar} \left[ \frac{m^2K}{W} \right]$		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		→	— ↑	↓ —
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005.

A Resistência térmica de ambiente a ambiente ( $R_T$ ) é determinada pela equação 7 (ABNT, 2005).

$$R_T = R_{se} + R_t + R_{si} \quad (7)$$

Onde:

$R_T$  = Resistência térmica de ambiente a ambiente  $\left[\frac{m^2K}{W}\right]$ ;

$R_t$  = Resistência térmica de superfície a superfície determinada pela equação 6;

$R_{se}$  e  $R_{si}$  = Resistência superficial externa e interna, respectivamente, obtidas na tabela 10;

A Resistência térmica superficial varia de acordo com vários fatores, tais como: emissividade, velocidade do ar sobre a superfície e temperaturas da superfície, do ar e superfícies próximas (ABNT, 2005). A resistência superficial é considerada externa ( $R_{se}$ ) quando a superfície considerada está limitando o material e o meio exterior, e é considerada interna ( $R_{si}$ ) quando a superfície limita o material e o meio interior. A **Tabela 10** apresenta valores médios recomendados para a resistência térmica superficial interna e externa.

**Tabela 10.** Resistência térmica superficial Interna e Externa.

Resistência Superficial Interna			Resistência Superficial Externa		
$R_{si} \left[\frac{m^2K}{W}\right]$			$R_{se} \left[\frac{m^2K}{W}\right]$		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
					
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

**Fonte:** Adaptado de ABNT, 2005.

A transmitância térmica ( $U$ ) representa a transmissão de calor em unidade de tempo e através de uma área unitária de um elemento ou componente construtivo. A transmitância térmica de um componente é o inverso da resistência térmica total e é determinada através da **equação 8** (ABNT, 2005). A transmitância térmica é a propriedade mais importante para avaliar o desempenho térmico de fechamentos opacos frente à transmissão de calor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (8)$$

Onde:

U= Transmitância térmica  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ ;

$R_T$  = Resistência térmica total  $\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$ .

O atraso térmico ( $\varphi$ ) de um componente formado por diferentes materiais superpostos em “n” camadas paralelas às faces e perpendiculares ao fluxo de calor é determinado a partir da **equação 8** (ABNT, 2005).

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2} \quad (9)$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_o}{R_t} = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{T_{ext}}}{R_t} \quad (10)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left(\frac{(\lambda \cdot \rho \cdot c)_{ext}}{R_t}\right) \cdot \left(R_{ext} - \frac{R_t - R_{ext}}{10}\right) \quad (11)$$

Onde:

$\varphi$ = Atraso térmico [horas];

$R_t$  = Resistência térmica de superfície a superfície  $\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$ ;

$\lambda$  = Condutividade térmica do material  $\left[\frac{W}{m K}\right]$ ;

$\rho$ = Densidade de massa aparente do material  $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ ;

c= Calor específico do material  $\left[\frac{kJ}{kg.K}\right]$ ;

$R_{ext}$  = Resistência da última camada do componente, junto à face externa  $\left[\frac{m^2 K}{W}\right]$ ;

$C_T$ = capacidade térmica total do componente  $\left[\frac{kJ}{m^2.K}\right]$ ;

$C_{T_{ext}}$ = capacidade térmica da camada externa do componente  $\left[\frac{kJ}{m^2.K}\right]$ ;

**Nota:** Considerar  $B_2$  nulo caso seja negativo.

O fator de ganho solar ( $FS_o$ ) de elementos opacos é determinado através da **equação 12** (ABNT, 2005). O seu valor representa qual a porcentagem da radiação solar incidente no fechamento que penetra no interior do ambiente.

$$FS_o = 4. U. \alpha \quad (12)$$

$FS_o$  = Fator solar de elementos opacos [%];

$U$  = Transmitância térmica do componente  $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ ;

$\alpha$  = Absortância à radiação solar em função da cor.

### 5.3. O Clima de Foz do Iguaçu e as Recomendações em Relação à Vedações

#### Verticais

Para indicar um tipo de fechamento vertical que funcione em termos térmicos para determinada localidade, é essencial uma análise do clima. O clima de Foz de Iguaçu é subtropical úmido mesotérmico, classificado como Cfa (clima temperado úmido com verão quente) pela classificação climática de Köppen-Geiger. A descrição do clima Cfa é apresentada na **Tabela 11**.

**Tabela 11.** Regiões fundamentais e classes climáticas de Foz do Iguaçu-PR, segundo a classificação de Köppen-Geiger.

Grupo climático	Regiões fundamentais	Classes climáticas
<b>C</b> <b>Clima temperado quente</b>	<b>F</b> <b>Clima úmido</b>	<b>A</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• A temperatura média do ar do mês mais frio deverá estar compreendida entre -3°C e 18°C;</li> <li>• Temperatura média do mês mais quente maior que 10°C;</li> <li>• Estações de Verão e Inverno bem definidas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ocorrência de precipitação em todos os meses do ano;</li> <li>• Inexistência de estação seca definida;</li> <li>• A precipitação média do mês mais seco deveser superior a 60 mm.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apresenta verão quente;</li> <li>• A temperatura média do ar no mês mais quente deverá ser superior a 22°C.</li> </ul>

**Fonte:** Elaborado a partir de Sá Jr (2009).

O clima de Foz do Iguaçu tem uma das maiores amplitudes térmica anuais do estado do Paraná, valor aproximado de 11°C de diferença média entre o inverno e o verão. Isso ocorre devido a uma menor influência da maritimidade do que a que a observada em outros municípios. Por essa razão, os verões costumam ser de altas temperaturas, com máximas médias em torno dos 33°C, chegando a superar a marca dos 40°C. Apesar de serem considerados amenos, os invernos propiciam quedas bruscas de temperaturas, as chuvas costumam ser bem distribuídas durante o ano, com uma pequena redução no inverno. A precipitação anual varia em torno dos 1.800mm (TURISMO PARANÁ, 2014).

### 5.3.1. Análise Climática x Desempenho Térmico no contexto da NBR 15220-3

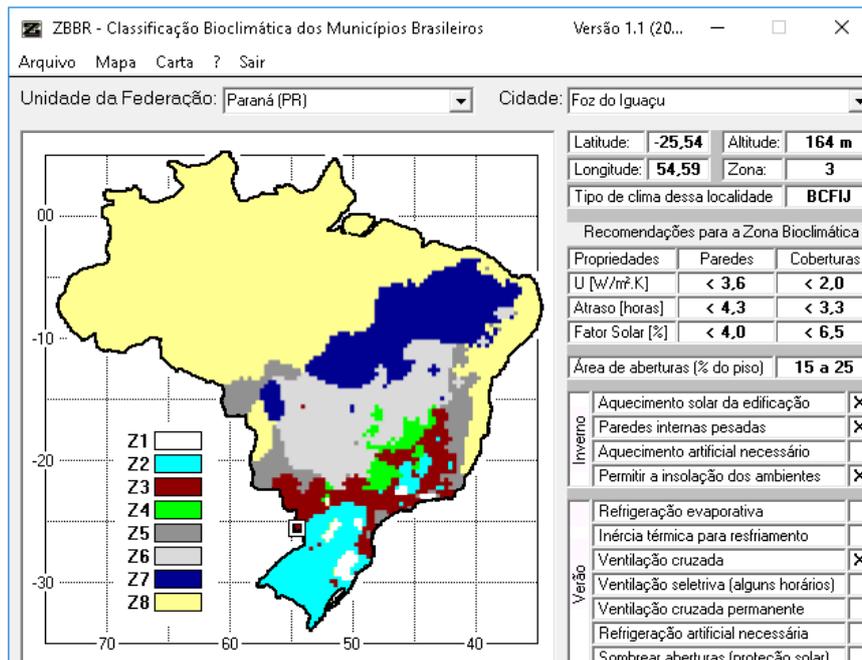
O **Quadro 3** indica as estratégias de condicionamento térmico que são indicadas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), para a Zona Bioclimática 3, especificamente para Foz do Iguaçu (BCFIJ), conforme Carta Bioclimática.

**Quadro 3.** Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico.

Estratégias	Características	Detalhamento das Estratégias
<b>B</b>	Zona de aquecimento solar da edificação	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
<b>C</b>	Zona de massa térmica para aquecimento	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
<b>F</b>	Zona de desumidificação (renovação do ar)	As sensações térmicas são melhoradas através da desumidificação dos ambientes. Esta estratégia pode ser obtida através da renovação do ar interno por ar externo através da ventilação dos ambientes.
<b>H e I</b>	Zona de massa térmica de refrigeração	Temperaturas internas mais agradáveis também podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem.
<b>I e J</b>	Zona de ventilação	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também se deve atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos. As janelas deverão se localizar em fachadas opostas para potencializar a ventilação cruzada.

**Fonte:** Elaborado a partir de ABNT (2005).

O programa ZBBR, desenvolvido por Roriz (2004) junto à USFCAR, que faz a classificação bioclimática das sedes dos municípios brasileiros e indica as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, baseado na NBR 15220-3, foi utilizado para visualizar as diretrizes construtivas indicadas pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). Na **Figura 19** apresenta-se as características e recomendações climáticas para a cidade de foz do Iguaçu de acordo com o programa ZBBR.



**Figura 19.** Recomendações para o clima de Foz do Iguaçu-PR.  
Fonte: Roriz, 2004.

#### 5.4. Análise Climática x Desempenho Térmico no contexto da NBR 15575-1 e NBR 15575-4

De acordo com a ABNT NBR 15575-1, a edificação habitacional deve reunir características que atendam aos requisitos de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática definida na ABNT NBR 15220-3. Para a avaliação da adequação de habitações, a ABNT NBR 15575-1 estabelece o procedimento-1: simplificado (normativo): atendimento aos requisitos e critérios para os sistemas de vedação vertical e coberturas conforme ABNT NBR 15575-4 e ABNT NBR 15575-5, onde, caso a avaliação da transmitância térmica e capacidade térmica, resultem em desempenho térmico insatisfatório, deve-se avaliar o desempenho térmico da edificação, como um todo, pelo método da simulação computacional.

A mesma norma (ABNT, 2013a) estabelece também o procedimento-2: medição (informativo) que engloba a verificação do atendimento aos requisitos e critérios, através de medições em edificações ou protótipos construídos. Esse procedimento é de caráter meramente informativo e não se sobrepõem ao procedimento simplificado (ABNT, 2013a).

A ABNT NBR 15575-4 apresenta também os requisitos e critérios para verificação dos níveis mínimos de desempenho térmico dos Sistemas de Vedações Verticais Externas (SVVE), que podem ser avaliados de duas formas: a primeira considerando o procedimento simplificado, com base nas propriedades térmicas das fachadas e a segunda através da

simulação computacional, caso não atendam aos critérios analisados conforme o procedimento simplificado (ABNT, 2013b).

Os SVVE devem apresentar transmitância térmica e capacidade térmica que proporcionem pelo menos o desempenho térmico mínimo estabelecido na ABNT NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) para cada zona bioclimática brasileira. Na **Tabela 12** são apresentados os valores máximos admissíveis para a transmitância térmica (U) das paredes externas. Na **Tabela 13** são apresentados os valores mínimos admissíveis para a capacidade térmica (CT) das paredes externas (ABNT, 2013b). O método de cálculo da transmitância e da capacidade térmica foram apresentados na seção 5.2.

**Tabela 12.** Transmitância térmica das paredes externas - valores máximos admissíveis.

Transmitância Térmica U [W/m <sup>2</sup> .K]		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7, 8	
U ≤ 2,5	$\alpha^a \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
	U ≤ 3,7	U ≤ 2,5

<sup>a</sup>: absortância à radiação solar da superfície externa da parede

**Fonte:** Adaptado de (ABNT, 2013b).

**Tabela 13.** Capacidade Térmica de paredes externas - valores mínimos admissíveis.

Capacidade Térmica CT [kJ/m <sup>2</sup> .K]	
Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	Zona 8
≥ 130	Sem requisito

**Fonte:** Adaptado de (ABNT, 2013b).

No seguinte capítulo apresenta-se a metodologia do presente trabalho, na qual constam as configurações das paredes estudadas e as considerações utilizadas na realização dos cálculos das propriedades térmicas pelo procedimento da NBR 15220-2 (ANBT, 2005a) e da simulação computacional.

## 6 METODOLOGIA

A metodologia utilizada no presente trabalho englobou desde o estudo do déficit habitacional e iniciativas tomadas como solução para o problema habitacional no Brasil até o estudo do sistema construtivo em *Wood Frame* como solução tecnológica para produção de habitação social na cidade de Foz do Iguaçu-PR. Compreendeu, nomeadamente:

- i) Revisão Bibliográfica, que incluiu o estudo do déficit habitacional e soluções para o problema habitacional, além do estudo do sistema construtivo *Wood Frame*;
- ii) Realização de estudo de caso, onde foi possível obter informações sobre o sistema construtivo *Wood Frame* aplicado na produção de habitação social no estado do Paraná;
- iii) Cálculo das propriedades térmicas dos materiais, baseado nas Normas Técnicas Brasileiras – ABNT;
- iv) Realização de simulação computacional, através do programa THERM 7.4;
- v) Análise de resultados e elaboração das conclusões.

### 6.1 Elaboração da Revisão Bibliográfica

Esta tarefa incluiu itens relacionados ao histórico e atualidades sobre habitação de interesse social, concepção das diretrizes de projeto destinadas à produção de habitação de interesse social em Foz do Iguaçu-PR, e ainda aspectos tecnológicos do sistema construtivo estudado. Os principais temas desenvolvidos foram:

- Pesquisa sobre o déficit habitacional, tendo como referência principal a publicação intitulada: “Déficit habitacional no Brasil 2013-2014”, publicada pela Fundação João Pinheiro em 2016;
- Pesquisa sobre as iniciativas de redução do problema habitacional no Brasil, tendo como referência livros e artigos técnicos;
- Estudo do sistema construtivo em *Wood Frame*, tendo como referência principal publicações da *America Wood Council* (AWC) e da *Canada Mortgage and Housing Corporation* (CMHC), entre outras fontes de informação;
- Estudo das propriedades térmicas dos materiais, tendo como referência principal livros e Normas Técnicas Brasileiras – ABNT.

## 6.2 Estudo de Caso

A ideia inicial do presente trabalho foi realizar um estudo de caso em habitações construídas em *Wood Frame*, de forma a visualizar a aplicação do sistema na prática. Porém, a ênfase maior do estudo foi visitar a fábrica da “Empresa A”, onde foi possível acompanhar parte do processo de montagem/fabricação de um painel de parede.

Para a realização do estudo de caso, foi elaborado um roteiro (**Figura 20**) para auxiliar na obtenção dos principais aspectos construtivos do sistema analisado, para aprimorar o conhecimento sobre o sistema, bem como, especificamente para obter características da composição do painel das vedações verticais, necessárias para o cálculo das propriedades térmicas e para utilizar posteriormente nas simulações computacionais.

Na realização do estudo de caso foram observados aspectos construtivos, tais como: tipologia construída, tipo de fundação empregada, revestimentos, composição de paredes externas e internas, esquadrias, instalações elétricas e hidráulicas, tipo de forro e cobertura.

ASPECTOS CONSTRUTIVOS				
<b>Tipologia</b>	<input type="checkbox"/> Térrea	<input type="checkbox"/> 2 pavimentos	Outro: _____	
<b>Fundação</b>	<input type="checkbox"/> Radier	<input type="checkbox"/> Sapata Corrida	<input type="checkbox"/> Outro: _____	
Aspectos relevantes da estrutura em madeira:				
<b>Estrutura</b>	_____			
<b>Revestimento do Piso</b>	<input type="checkbox"/> Cerâmico	<input type="checkbox"/> Cimento Liso	<input type="checkbox"/> Madeira	<input type="checkbox"/> Outro: _____
<b>Paredes Externas</b>	<b>Camada</b>	<b>Ordem</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>
	Painel estruturado			
	Isolamento térmico- acústico			
	Chapa de OSB			
	Membrana hidrófuga			
	Placa Cimentícia			
	Acabamento			
<b>Paredes Internas</b>	<b>Camada</b>	<b>Ordem</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>
	Painel estruturado			
	Isolamento térmico- acústico			
	Chapa de OSB			
	Placa de gesso acartonado			
	Acabamento			
	Parede completa			
<b>Esquadrias</b>	<b>Tipo</b>	<b>Material</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	
	Janelas			
Portas				
<b>Instalações Elétricas e Hidráulicas</b>	<input type="checkbox"/> Tubulação embutida	<input type="checkbox"/> Tubulação aparente		
<b>Forro</b>	<input type="checkbox"/> Madeira, tipo _____	<input type="checkbox"/> PVC	<input type="checkbox"/> Gesso	<input type="checkbox"/> Outro: _____
<b>Cobertura</b>	<input type="checkbox"/> Estrutura metálica <input type="checkbox"/> Estrutura em madeira			
	Tipo de telha:			
	<input type="checkbox"/> Cerâmica	<input type="checkbox"/> Metálica	<input type="checkbox"/> Fibrocimento	<input type="checkbox"/> Outro: _____
Espessura da telha: _____				

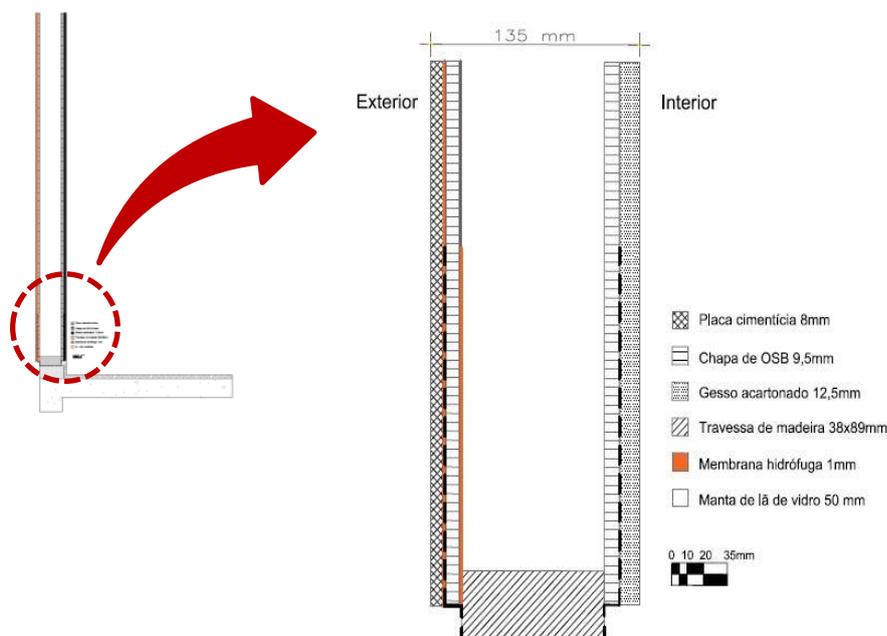
Figura 20. Roteiro de estudo de caso.

Além dos aspectos construtivos, também foram obtidos documentos complementares para aprofundamento do estudo de caso, principalmente o documento de avaliação técnica “Sistema de vedação vertical leve em madeira” (PBQP-H, 2015).

### 6.3 Paredes Analisadas

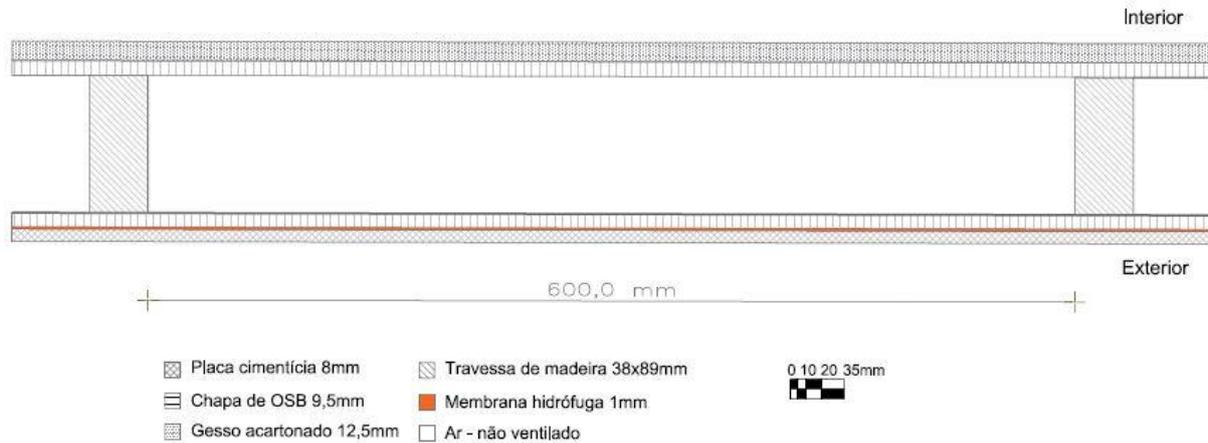
As paredes analisadas são paredes externas de áreas secas, e foram desenhadas com uma altura total de 1500mm, para uma maior uniformidade de análise. Foram analisadas quatro tipos de configuração de paredes: painel em *Wood Frame* com câmara de ar não ventilada, painel em *Wood Frame* com núcleo em lã de vidro e câmara de ar não ventilada, painel em *Wood Frame* com núcleo em lã de vidro e parede de alvenaria com tijolo cerâmico, para realizar uma comparação das características térmicas.

Na **Figura 21** apresenta-se o corte do painel em *Wood Frame* com câmara de ar não ventilada, de espessura nominal de aproximadamente 135mm, onde o lado externo é composto por placa cimentícia de 8mm, membrana hidrófuga de 1mm e placa de OSB de 9mm, separada do lado interno por uma câmara de ar não ventilada. O lado interno é composto por chapa de OSB de 9 mm e placa de gesso cartonado para *drywall* de 12,5mm. A parte inferior do painel é revestida por manta asfáltica de 200mm de altura em ambos os lados.



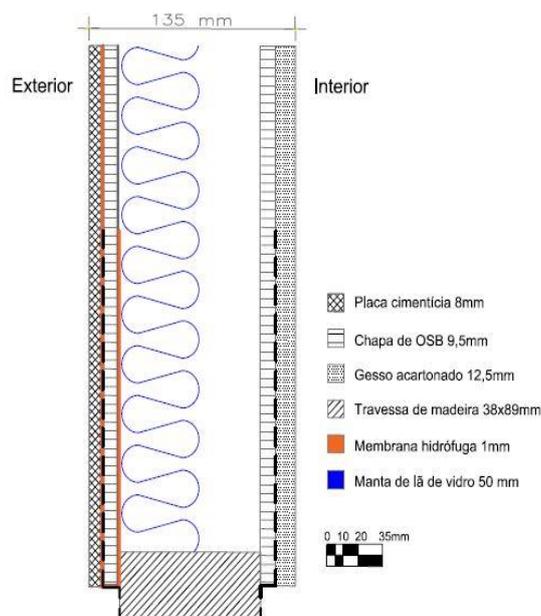
**Figura 21.** Corte Seção transversal do painel de *Wood Frame* analisado.  
**Fonte:** Elaborado a partir de PBQP-H (2015).

A **Figura 22** apresenta a planta do painel em *Wood Frame*, onde é possível observar os montantes de madeira com dimensões 38mm x 89mm que compõem o painel. Segundo PBQP-H (2015), o espaçamento entre montantes depende do cálculo estrutural e o espaçamento máximo entre montantes é de 600mm, logo, esse foi o espaçamento considerado.

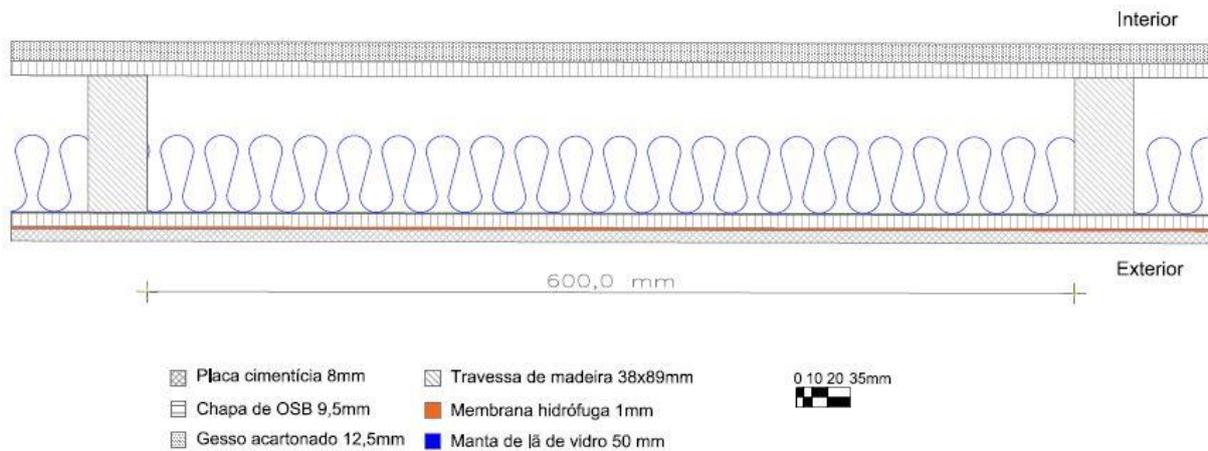


**Figura 22.** Planta do painel em Wood Frame analisado.  
**Fonte:** Elaborado a partir de PBQP-H, 2015.

A **Figura 23** apresenta o corte da seção transversal do painel em *Wood Frame* com núcleo em lã de vidro e câmara de ar não ventilada e a **Figura 24** apresenta a planta do mesmo painel. A configuração do painel é a mesma do painel descrito acima, com a diferença do núcleo, que nesse caso é composto por uma camada de lã de vidro com 50 mm de espessura e a outra parte de câmara de ar não ventilada.



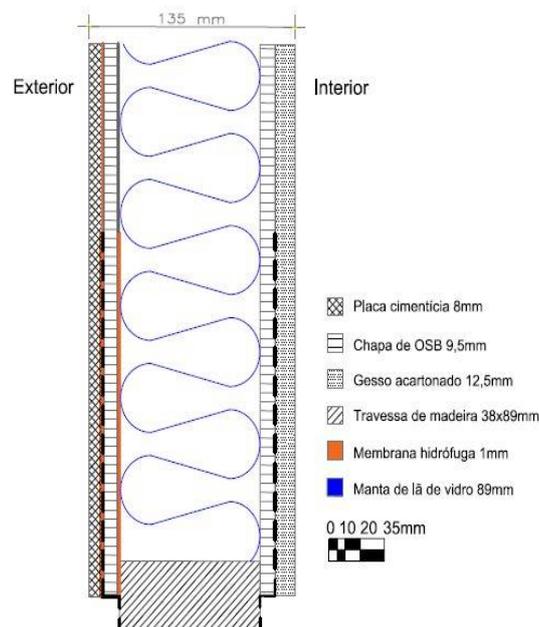
**Figura 23.** Corte seção transversal do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro e câmara de ar não ventilada.  
**Fonte:** Adaptado de PBQP-H, 2015.



**Figura 24.** Planta do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro e câmara de ar não ventilada.

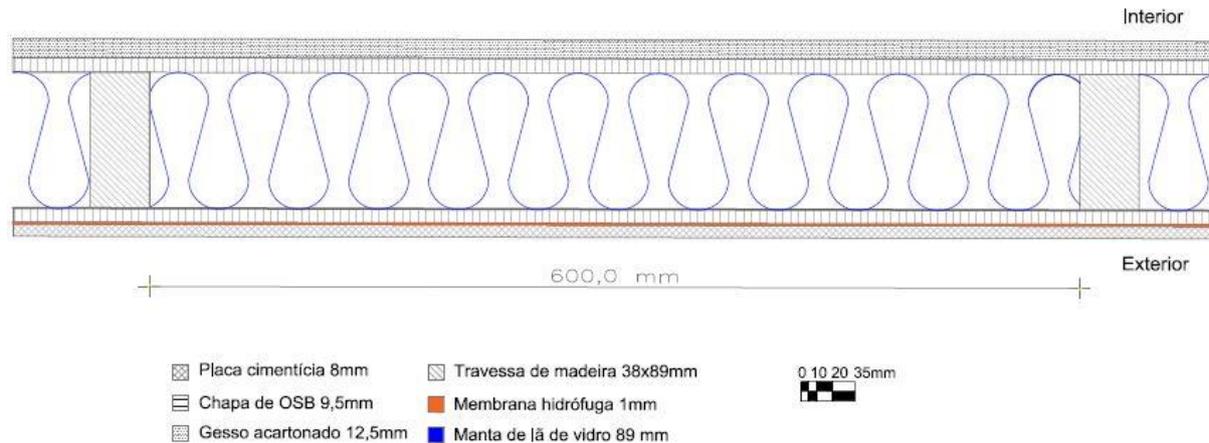
**Fonte:** Adaptado de PBQP-H, 2015.

A **Figura 25** apresenta o corte da seção transversal do painel em *Wood Frame* com núcleo em lã de vidro e a **Figura 26** a planta do mesmo painel. A configuração do painel é a mesma do painel apresentado na Figura 21, porém, com o núcleo preenchido totalmente com manta de lã de vidro.



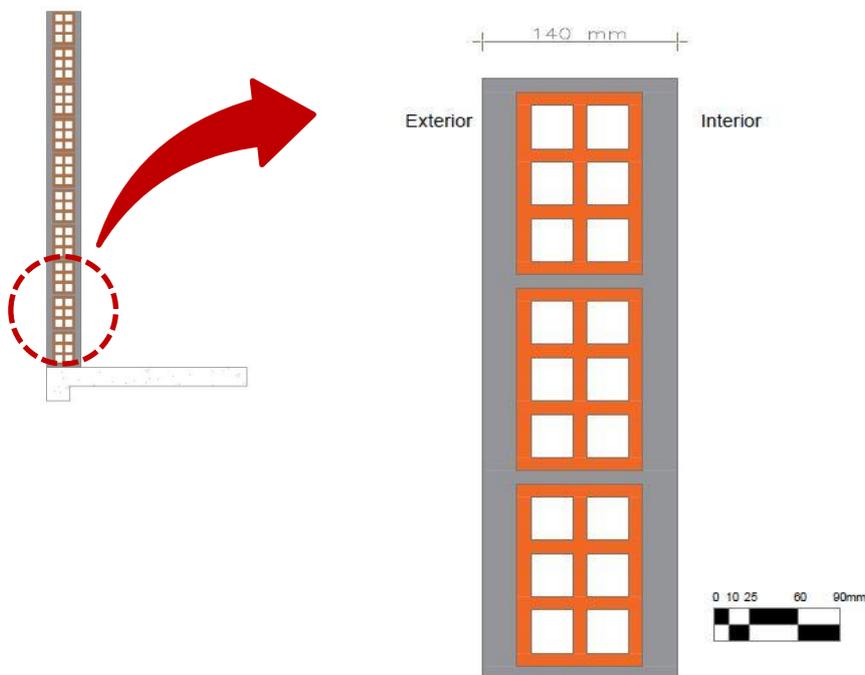
**Figura 25.** Corte seção transversal do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro.

**Fonte:** Adaptado de PBQP-H, 2015.



**Figura 26.** Planta do painel de Wood Frame com núcleo em lã de vidro.  
**Fonte:** Adaptado de PBQP-H, 2015.

A **Figura 27** apresenta a parede em alvenaria de espessura nominal de aproximadamente 14cm constituída com o tijolo cerâmico mais utilizado em construções residenciais em alvenaria na cidade de Foz do Iguaçu de dimensões 9cmx 14cmx 24cm, espessura do reboco de 2,5 cm, espessura da argamassa de assentamento de 1cm, dimensões internas do tijolo de 1 cm e câmaras de ar não-ventiladas de 3cm x 3,33cmx 24cm. Destaca-se que a parede de alvenaria é simétrica, portanto, o lado interno e externo apresentam as mesmas camadas e dimensões.



**Figura 27.** Parede em alvenaria analisada.

As unidades das paredes foram descritas acima em suas unidades reais, pois no *Wood Frame* as espessuras são em [mm] e na parede de alvenaria o usual é em [cm]. Para o cálculo

das propriedades térmicas realizadas com base na NBR 15220-2 (ABNT, 2005) as dimensões foram inseridas em [m] e para a simulação computacional no Software THERM 7.4, todas as dimensões foram inseridas em [mm].

Dos três tipos de configuração de painel em *Wood Frame* analisados, apenas a configuração do painel com câmara de ar não ventilada é a usual para paredes externas de áreas secas, aplicado pelo sistema da “Empresa A”. A lã de vidro é aplicada em uma camada de 50mm apenas em paredes de geminação. Porém, apesar das demais configurações não serem configurações usuais, optou-se por inserir nos estudos tais modificações de forma a analisar a transferência de calor com a adição de uma camada de material isolante, nas distintas composições de fechamentos para comparar qual seria a consequência em termos de desempenho térmico.

#### 6.4 Cálculo das propriedades térmicas dos materiais

Para a realização dessa etapa, primeiramente foi verificada a composição usual do painel de vedação vertical utilizado no sistema em *Wood Frame* em habitações sociais no estado do Paraná, através do estudo de caso e o tipo de bloco cerâmico utilizado no sistema convencional na cidade de Foz do Iguaçu. Após a determinação dos materiais constituintes e suas respectivas espessuras, foram calculadas as propriedades térmicas do painel e da parede convencional. Foram calculados especificamente: a transmitância térmica, a resistência térmica, o fator de ganho de calor solar e o atraso térmico.

Os cálculos das propriedades citadas anteriormente foram baseados nas normas NBR 15220: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 (ABNT, 2005) e NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho - Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas (ABNT, 2013b).

A **Tabela 14** apresenta os valores da densidade de massa aparente ( $\rho$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e calor específico ( $c$ ) dos materiais constituintes do painel de vedação em *Wood Frame* e da parede de alvenaria, considerados nos cálculos das propriedades térmicas.

**Tabela 14.** Propriedades dos materiais componentes das camadas do painel em *Wood Frame* e da parede em alvenaria convencional.

<b>Wood Frame</b>			
<b>Camada</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/(m.K)]</b>	<b>c [kJ(kg.K)]</b>
Chapa de OSB	650	0,14	2,30
Gesso Acartonado	750-1000	0,35	0,84
Lã de vidro	10,35	0,045	0,70
Membrana hidrófuga	910	0,25 <sup>2</sup>	1,70
Pinus	450-600	0,15	1,34
Placa cimentícia	1700	0,35	0,84
<b>Alvenaria Convencional</b>			
<b>Camada</b>	<b><math>\rho</math> [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\lambda</math> [W/(m.K)]</b>	<b>c [kJ(kg.K)]</b>
Tijolo cerâmico	1600	0,90	0,92
Argamassa de assentamento	2000	1,15	1,00
Reboco	2000	1,15	1,00

**Fonte:** ABNT, 2005;

Os cálculos foram realizados de acordo com as seguintes considerações:

- Foz do Iguaçu está localizada na Zona Bioclimática 3, portanto, as condições  $U \leq 3,7$  e  $CT \geq 130$ , de acordo com a Tabelas 12 e Tabela 13, são aplicáveis;
- Foi admitida uma absorvância à radiação solar da superfície externa da parede clara, com  $\alpha=0,3$ ;
- Como a direção do fluxo de calor que atravessa as paredes é horizontal, tem-se: Resistência térmica superficial interna ( $R_{si}$ )= 0,13 [m<sup>2</sup>.K/W], Resistência térmica superficial externa ( $R_{se}$ )= 0,04 [m<sup>2</sup>.K/W];
- A resistência da câmara de ar ( $R_{ar}$ ) para parede em alvenaria foi de 0,16 [m<sup>2</sup>.K/W], considerando uma câmara de ar não-ventilada, com superfície de alta emissividade de espessura  $2\text{mm} < e \leq 5\text{ mm}$  e direção do fluxo de calor horizontal, de acordo com os dados apresentados anteriormente na Tabela 9;
- A resistência da câmara de ar ( $R_{ar}$ ) para parede em Wood Frame foi de 0,17 [m<sup>2</sup>.K/W], considerando uma câmara de ar não-ventilada, com superfície de alta emissividade de espessura  $e > 5\text{mm}$ , e direção do fluxo de calor horizontal, de acordo com os dados apresentados anteriormente na Tabela 9;

<sup>2</sup> Não foi possível obter acesso aos valores das propriedades da membrana hidrófuga exatamente, portanto os valores utilizados são referentes ao polipropileno, material do qual a membrana é composta. Disponível em:<<http://www.incomplast.com.br/polipropilenopp>>.

- f) Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa ( $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ ), a sua capacidade térmica em componentes com câmaras de ar pode ser desprezada (ABNT, 2005);
- g) No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a  $0,065 \text{ W/(mK)}$  e resistência térmica maior que  $0,5 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ , o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar (ABNT, 2005).

Os resultados dos cálculos das propriedades térmicas dos materiais foram analisados, tendo como base as indicações das normas norteadoras citadas anteriormente e são apresentados no Capítulo 7.

## 6.5 Simulação computacional

Após o cálculo das propriedades térmicas dos materiais descritas acima, foi realizado o modelamento do painel usual no sistema em *Wood Frame* e suas variações e alvenaria convencional, por meio do software AutoCAD, para posterior importação no software THERM 7.4, no qual foi realizada a simulação térmica do painel.

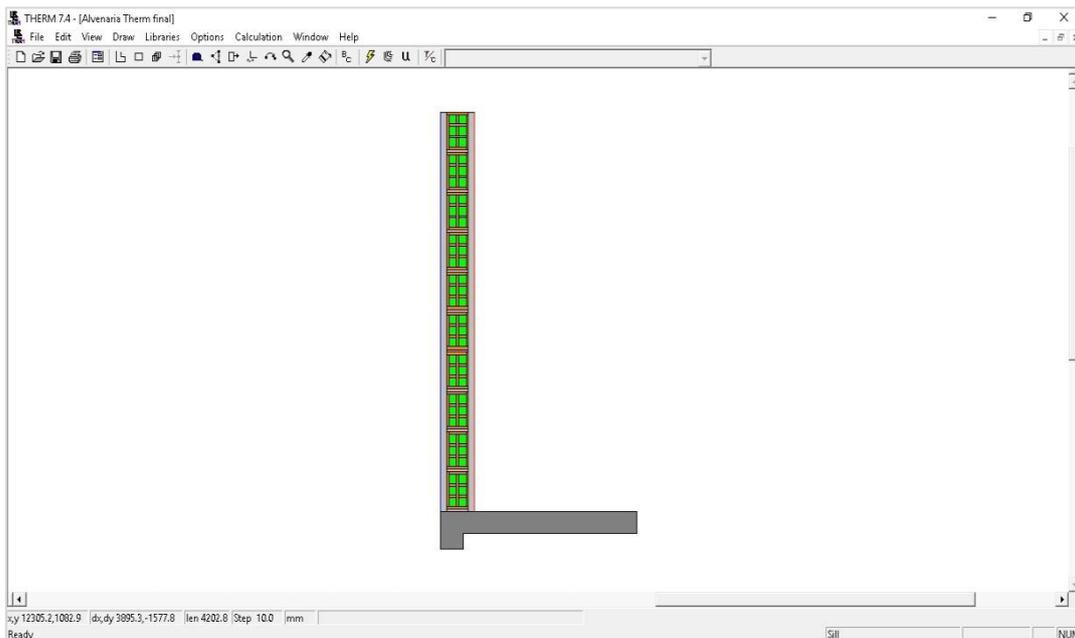
### 6.5.1 Software THERM 7.4

O software THERM<sup>3</sup>, desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Berkeley (LBNL), é um programa de elementos finitos 2D que permite modular os efeitos de transferência de calor em componentes dos edifícios como janelas, paredes, fachadas, fundações, coberturas, etc. Por meio da análise dos resultados de simulação é possível identificar as pontes térmicas que possam existir no edifício, determinar o coeficiente de transmissão térmica (U) e a resistência térmica (R) de uma solução construtiva e as temperaturas diretamente relacionadas com problemas de condensação, umidade e integridade estrutural.

O programa gera automaticamente uma malha e utiliza o método de elementos finitos para estudar a transferência de calor por condução em 2D. Os resultados podem ser apresentados em forma de linhas isotérmicas ou por meio de diagrama de cores, vetores de fluxo de calor, temperaturas ou linhas de fluxo constante. O programa também calcula os valores do coeficiente de transmissão térmica (U) das superfícies exterior e interior da seção analisada (MARTINS, 2013).

---

<sup>3</sup> Para obter mais informações sobre o programa, visitar o site: < <https://windows.lbl.gov/software/therm/therm.html> >



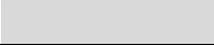
**Figura 28.** Interface do programa THERM 7.4.  
**Fonte:** LBNL, 2016.

### 6.5.2 Execução das simulações computacionais

Para simular um componente no THERM 7.4, pode-se criar o desenho na própria interface do programa ou importá-lo do AutoCAD, na versão AutoCAD R12/LT2 DXF, já que o THERM não consegue ler arquivos DXF do AutoCAD 2000 e versões mais recentes. As dimensões do desenho deve estar em milímetros [mm] para ser simulado. No presente trabalho, optou-se pela importação do arquivo em AutoCAD.

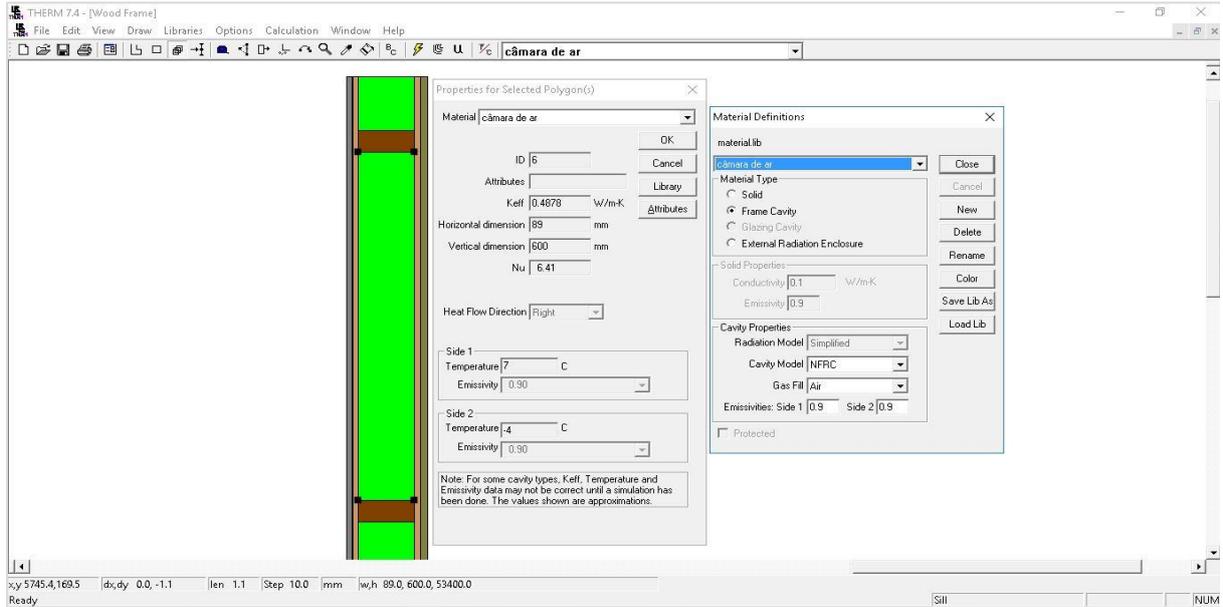
Após a importação, já na interface do THERM, foram criados polígonos para representar os diferentes elementos, com seus respectivos tipos de materiais para a seção analisada. O programa oferece uma biblioteca de materiais e propriedades que podem ser utilizadas na definição dos elementos da seção, ou pode-se ainda atribuir novos materiais, inserindo valores da emissividade e de condutividade térmica de cada novo material inserido na biblioteca do programa. A **Tabela 15** apresenta os valores da emissividade ( $\epsilon$ ), condutividade térmica ( $\lambda$ ) e as cores das camadas de material utilizadas na simulação do painel em *Wood Frame* e da parede em alvenaria.

**Tabela 15.** Propriedades térmicas utilizadas no THERM 7.4.

<b>Wood Frame</b>			
<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b><math>\lambda</math> [W/(m.K)]</b>	<b>Cor</b>
Chapa de OSB	0,9	0,14	
Gesso Acartonado	0,9	0,35	
Lã de vidro	0,9	0,045	
Membrana hidrófuga	0,9	0,25	
Placa cimentícia	0,9	0,35	
Pinus	0,9	0,15	
<b>Alvenaria Convencional</b>			
<b>Material</b>	<b><math>\epsilon</math></b>	<b><math>\lambda</math> [W/(m.K)]</b>	<b>Cor</b>
Argamassa	0,9	1,15	
Reboco	0,9	1,15	
Tijolo	0,9	0,90	
Câmara de Ar	*	*	

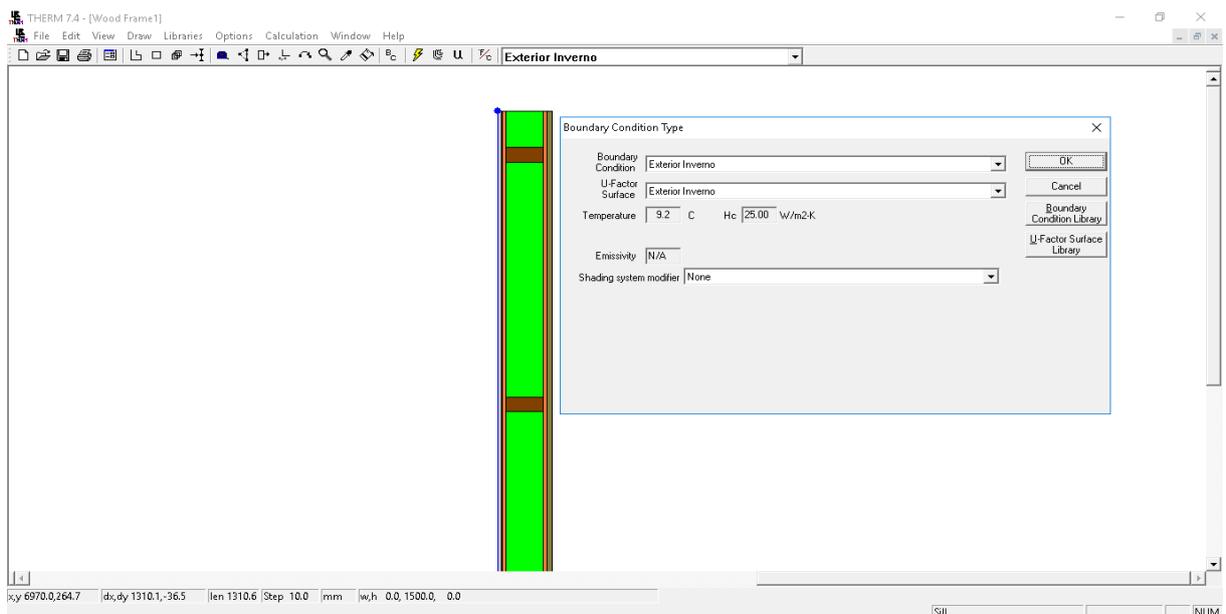
\*No THERM as câmaras de ar são modeladas utilizando o modelo de cavidade ISO 15099 *Cavity Model*, o qual possui dois tipos: *Frame Cavity NFRC 100*<sup>4</sup> e *Frame Cavity Slightly Ventilated NFRC 100*. Como no presente trabalho as câmaras de ar existente é do tipo não ventilada, a opção *Frame Cavity NFRC 100* é aplicável. Nesse modelo, o programa considera para o lado 1 da câmara de ar uma temperatura de 7°C e para o lado 2 uma temperatura de -4°C. Esses valores são aproximados e não há a necessidade de modificá-los, pois o programa ajusta essas características durante a simulação e recalcula as temperaturas das paredes da cavidade com base nas temperaturas dos materiais circundantes e determina a direção do fluxo de calor, com base nas diferenças de temperatura (LBNL, 2011). Vale destacar, que ao definir o polígono como *frame cavity* ou câmara de ar, essas características já são adicionadas e não é necessária nenhuma modificação. A **Figura 29** apresenta a atribuição dos polígonos com a definição dos materiais, dando destaque para a atribuição de uma câmara de ar não ventilada.

<sup>4</sup> Baseado na publicação : Determining Fenestration Product U-factors produzida pelo National Fenestration Rating Council Incorporate (NFRC) Para maiores detalhes acessar: <http://www.nfrccommunity.org/default.asp?page=techdocs>



**Figura 29.** Atribuição da câmara de ar no painel em Wood Frame no software THERM 7.4.

Uma vez definidos os materiais, definem-se as condições de contorno do componente. Nessa etapa deve-se criar uma condição interior e outra exterior para a realização dos cálculos. Nas partes do componente onde não há trocas de calor, a condição de contorno é definida como adiabática. Definidas as condições de contorno para o lado externo e interno da parede, os cálculos das propriedades térmicas podem ser realizado e os gráficos gerados. A **Figura 30** apresenta um exemplo de atribuição de condição de contorno externa, nesse caso para o inverno.



**Figura 30.** Atribuição da condição de contorno externa para o inverno no software THERM 7.4..

Para as definições das condições de contorno do presente trabalho, como se trata da análise de um gradiente térmico num componente, há a necessidade de inserir no THERM uma temperatura externa e outra interna para simulação. No caso das temperaturas externas de verão e inverno, os valores adotados correspondem ao valor máximo e mínimo respectivamente, registrados para a cidade de Foz do Iguaçu, de acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia - INMET (BRASIL, 2016). Para as temperaturas internas foram utilizadas as recomendações NBR 15575-1, item 11.2, referente a simulação computacional, pelo fato de que a NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) apenas apresenta valores de transmitância e capacidade térmica para análise simplificada do desempenho térmico de paredes externas, como apresentado na seção 5.4, e como não se refere as condições de temperatura, optou-se pelas recomendações de avaliação do desempenho térmico para condições de verão e inverno da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a), apresentadas na **Tabela 16** e **Tabela 17**, respectivamente.

Ressalta-se que o procedimento da simulação computacional recomendado pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013a), deve abranger a edificação habitacional como um todo, porém, o presente trabalho trata-se do estudo do desempenho térmico apenas do painel de parede, ou seja, de um componente isolado.

**Tabela 16.** Critério de avaliação de desempenho térmico – Condições de Verão.

Nível de Desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$	$T_{i,máx.} \leq T_{e,máx.}$
I	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 2 \text{ °C})$	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 1 \text{ °C})$
S	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 4 \text{ °C})$	$T_{i,máx.} \leq (T_{e,máx.} - 2 \text{ °C})$

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

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

**Fonte:** Adaptado de (ABNT, 2013a).

**Tabela 17.** Critério de avaliação de desempenho térmico – Condições de Inverno.

Nível de Desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 5	Zona 6,7 e 8
M	$T_{i,min.} \geq (T_{e,min.} + 3 \text{ °C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min.} \geq (T_{e,min.} + 5 \text{ °C})$	
S	$T_{i,min.} \geq (T_{e,min.} + 7 \text{ °C})$	

$T_{i,min.}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius.

$T_{e,min.}$  é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius.

**Fonte:** Adaptado de (ABNT, 2013a).

Para requisitos de desempenho no inverno e no verão, o nível mínimo de aceitação é nível M (denominado mínimo) de atendimento para o desempenho térmico. Porém, para maior conforto dos usuários, recomenda-se para os níveis Intermediário – (I) e superior – (S) os valores apresentados nas tabelas acima (ABNT, 2013a).

A **Tabela 18** apresenta as condições de contorno utilizadas na simulação computacional. Os valores de temperatura ambiente na condição interior correspondem aos valores temperatura exigidos para o cumprimento do desempenho térmico mínimo, intermediário e superior para a Zona Bioclimática 3, de acordo com o procedimento de simulação computacional da NBR 15575-1 (ABNT, 2013a), de acordo com as fórmulas da **Tabela 16** e **Tabela 17**, apresentadas anteriormente. Nesse caso, as temperaturas indicadas se referem a temperaturas internas dos ambientes, com a aplicação de um determinado tipo de parede/ painel.

Destaca-se mais uma vez, que mesmo não se tratando da simulação computacional de uma edificação como um todo, os valores da temperatura interna foram baseados no procedimento da 15575-1 (ABNT, 2013a), devido à necessidade de avaliar um gradiente de temperatura no componente. Independente de inserir temperaturas internas e externas, o objetivo não foi verificar os valores de temperaturas que ocorreram no interior do componente, mas sim como ocorre o gradiente térmico, ou seja, a variação de temperatura nas diferentes camadas, independente dos seus valores.

**Tabela 18.** Condições de contorno utilizadas na simulação computacional.

Condição		Temperatura Ambiente °C	Condutividade superficial <sup>a</sup> [W/(m <sup>2</sup> /K)]	Cor
Inverno Interior	Nível Mínimo	12,2	7,692	Vermelha
	Nível Intermediário	14,2		
	Nível Superior	16,2		
Inverno - Exterior		9,2	25	Azul
Verão Interior	Nível Mínimo	32	7,692	Vermelha
	Nível Intermediário	31		
	Nível Superior	29		
Verão - Exterior		33	25	Vermelha

<sup>a</sup> Os valores 7,69 [W/m<sup>2</sup>/K] e 25 [W/m<sup>2</sup>/K] equivalem a  $R_{si} = 0,13$  [m<sup>2</sup>K/W] e  $R_{se} = 0,04$  [m<sup>2</sup>K/W], respectivamente.

Fonte: Elaborado a partir de ABNT, 2013a; INMET, 2016.

Para as condições de Inverno, a cor azul representa a condição de contorno externa com  $T_{externa} = 9,2^{\circ}\text{C}$  e a cor vermelha representa a condição de contorno interna. Para as condições de verão, a cor vermelha representa a condição de contorno  $T_{externa} = 33^{\circ}\text{C}$  e a cor

ciano representa a condição de contorno interna. Note-se que essa convenção foi adotada para diferenciar cores que representam temperaturas frias e temperaturas quentes. No caso do inverno, o exterior é mais frio que o interior e no verão a situação é contrária, o exterior é mais quente que o interior.

### **6.5.3 Análise dos resultados das simulações**

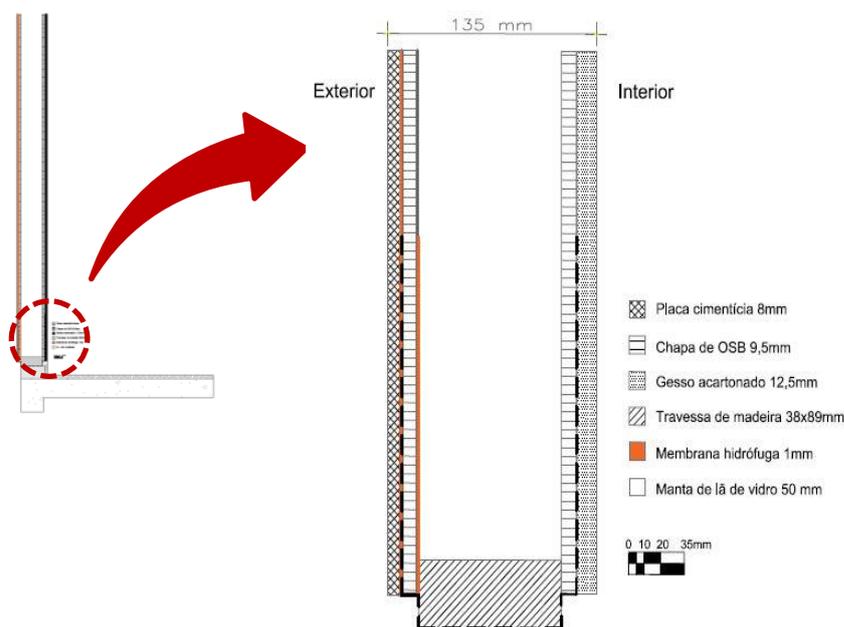
Os resultados das simulações computacionais são apresentados no capítulo seguinte. Para a análise dos resultados das simulações computacionais, além dos gráficos gerados pelo software, foram geradas tabelas com os resultados da transmitância e resistência térmica, calculados pelo THERM, para as configurações dos painéis em *Wood Frame* e parede em alvenaria para comparação com os resultados calculados por meio de planilhas. A partir desses dados, foram gerados gráficos para melhor comparação entre os resultados da simulação e o das propriedades térmicas calculadas pelo procedimento da NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

## 7 RESULTADOS

### 7.1 Estudo De Caso

As informações obtidas sobre o sistema construtivo em *Wood Frame* foram baseadas nas observações da visita *in loco*, juntamente com os dados obtidos no documento técnico sobre o sistema (PBQP-H, 2015).

Para uma melhor visualização da composição da parede obtida no estudo de caso, apresenta-se na **Figura 31**, um corte no qual é possível identificar as camadas da parede externa de áreas secas. Note-se que no canto superior esquerdo da figura em questão, apresenta-se a parede completa em tamanho reduzido. Portanto, a imagem maior representa o detalhe da zona tracejada, apresentando principalmente as camadas que compõem o painel de parede.



**Figura 31.** Composição da parede externa de áreas secas.

**Fonte:** Elaborado a partir de PBQP-H (2015).

Os aspectos construtivos observados na realização do estudo de caso e a composição do painel de *Wood Frame* com as respectivas espessuras são apresentados na **Tabela 19**.

**Tabela 19.** Aspectos construtivos do Wood Frame.

ASPECTOS CONSTRUTIVOS				
<b>Tipologia</b>	(x) Térrea ( ) 2 pavimentos Outro: _____			
<b>Fundação</b>	(x) Radier ( ) Sapata Corrida ( ) Outro _____			
<b>Estrutura</b>	Aspectos relevantes da estrutura em madeira: O quadro estrutural é composto por peças de madeira serrada autoclavada, com soleira inferior, montantes com espaçamento máximo permitido de 600mm e dupla soleira superior.			
<b>Revestimento do Piso</b>	(x) Cerâmico ( ) Cimento Liso ( ) Madeira ( ) Outro: _____			
<b>Paredes Externas</b>	<b>Camada</b>	<b>Ordem</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>
	Painel estruturado	1	Madeira – Pinus elliotti	38
	Isolamento térmico-acústico	2	Lã de vidro	-
	Chapa de OSB	3	OSB estrutural classe A	9,5
	Membrana hidrófuga	4	-	-
	Placa Cimentícia	5	Placa cimentícia	8
	Acabamento	6	Pintura	-
	Parede completa	-	-	135
<b>Paredes Internas</b>	<b>Camada</b>	<b>Ordem</b>	<b>Material</b>	<b>Espessura (mm)</b>
	Painel estruturado	1	Madeira – Pinus elliotti	38
	Isolamento térmico-acústico	2	Lã de vidro	-
	Chapa de OSB	3	OSB estrutural classe A	9,5
	Placa de gesso cartonado	4	Gesso cartonado	12,5
	Acabamento	5	Pintura/Cerâmica	-
		Parede completa	-	-
<b>Esquadrias</b>	<b>Tipo</b>	<b>Material</b>	<b>Dimensões (mm)</b>	
	Janelas	Alumínio	1200x1200 – dormitórios 1600x1200 - sala	
	Portas	Madeira/alumínio	800x2100 – dormitório (madeira)	
<b>Instalações Elétricas e Hidráulicas</b>	(x) Tubulação embutida ( ) Tubulação aparente			
<b>Forro</b>	( ) Madeira, tipo _____ (x) PVC ( ) Gesso ( ) Outro: _____ Obs: Sobre o forro de PVC é posicionada a manta de lã de vidro com e= 89mm.			
<b>Cobertura</b>	(x) Estrutura metálica (x) Estrutura em madeira			
	Tipo de telha:			
	(x) Cerâmica ( ) Metálica ( ) Fibrocimento ( ) Outro: _____ Espessura da telha: 20mm			

O sistema em *Wood Frame* executado pela “Empresa A” é destinado a tipologias térreas, podendo ser isoladas ou geminadas. Por se tratar de um sistema leve, possui fundação do tipo radier e o revestimento utilizado no piso é do tipo cerâmico. O processo de produção do painel de parede do sistema é executado em unidade fabril onde, após a

montagem dos quadros estruturais, estes são codificados e armazenados no estoque da fábrica e são encaminhados à obra sob demanda de execução.

A composição das paredes do sistema se dá da seguinte forma: as paredes estruturais do sistema são formadas por quadros estruturais em madeira, serradas e autoclavadas do tipo pinus, oriundas de florestas plantadas<sup>5</sup>, de classe estrutural C25 e com tratamento químico a base de CCA (Arseniato de Cobre Cromatado), de seções 38x89mm para paredes externas, 38x89mm ou 38x70mm para paredes internas e 38x140mm para paredes de geminação, onde a base dos quadros é envolvida por manta asfáltica impermeabilizante até uma altura de 200mm.

A parede externa com espessura nominal de 135mm é composta por chapas de OSB (*Oriented Strand Board*) estrutural de classe 2, com 9,5mm de espessura e que promovem o contraventamento da estrutura, membrana hidrófuga (barreira impermeável à água e permeável ao vapor) de 0,9mm de espessura, placas cimentícias de no mínimo classe A3 de 8mm de espessura, com uma demão de selador acrílico e por fim o acabamento, em textura acrílica. A face interna da parede externa é composta por chapas de OSB de 9,5 mm de espessura e placas de gesso cartonado para *drywall* de 12,5 mm de espessura.

A parede interna com espessura nominal de 135 ou 105mm é composta por chapas de OSB de 9,5 mm de espessura, placas de gesso acartonado para *drywall* de 12,5 mm de espessura, que são fixadas às chapas de OSB em ambos os lados da parede, onde em áreas secas é utilizada a placa de gesso cartonado do tipo Standard (ST), com acabamento em pintura acrílica e em áreas molhadas/molháveis é utilizada a placa de gesso cartonado do tipo Resistente à Umidade (RU), com acabamento e revestimento cerâmico até uma altura de 1500mm, seguido de pintura acrílica.

A parede de geminação com espessura nominal de 185mm é composta por um núcleo entre montantes em lã de vidro com 50mm de espessura, chapas de OSB de 9,5 mm de espessura, placas de gesso cartonado para *drywall* de 12,5 mm de espessura, que são fixadas às chapas de OSB em ambos os lados da parede.

As instalações elétricas e hidráulicas são embutidas nos painéis de parede e não são permitidas modificações em paredes, como abertura de vãos ou supressão de paredes. As esquadrias são compostas por janelas com caixilhos metálicos, com dimensões de 1200x1200mm para dormitórios e 1600x1200mm para salas; as portas e batentes são em alumínio ou madeira, com dimensões de 800x2100mm para dormitórios.

Por fim, a cobertura do sistema pode ser em estrutura metálica ou em madeira, com telhado em telha cerâmica de 20mm de espessura, com fechamento em forro de PVC com

---

<sup>5</sup> Aquela que se destina a produzir matéria-prima para as indústrias de madeira serrada, cuja implantação, manutenção e exploração seguem projetos previamente aprovados pelo IBAMA (BRASIL, 2016).

8mm de espessura e sobre o forro é posicionada manta de lã de vidro com 89mm de espessura.

## 7.2 Cálculo das Propriedades Térmicas dos materiais

A **Tabela 20** apresenta os resultados dos cálculos de resistência térmica ( $R_T$ ), transmitância térmica ( $U$ ), capacidade térmica ( $C_T$ ), atraso térmico ( $\varphi$ ) e Fator solar ( $FS_o$ ), calculadas para as configurações de parede externas de área secas em *Wood Frame* e da parede em alvenaria. Os cálculos das propriedades citadas anteriormente foram realizados com base no procedimento de cálculo da NBR 15220-2 (ABNT, 2005). Os cálculos completos são apresentados nos Apêndices.

**Tabela 20.** Resultados do cálculo das propriedades térmicas baseado na NBR 15220-2.

<b>Parede de alvenaria em tijolo cerâmico - Alvenaria</b>				
$R_T$	$U$	$C_T$	$FS_o$	$\varphi$
[(m <sup>2</sup> .K)/W]	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	[%]	[horas]
0,405	2,468	169,163	2,962	3,478
<b>Parede em <i>Wood Frame</i> com câmara de ar não ventilada - WFa</b>				
$R_T$	$U$	$C_T$	$FS_o$	$\varphi$
[(m <sup>2</sup> .K)/W]	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	[%]	[horas]
0,555	1,800	54,511	2,160	2,678
<b>Parede em <i>Wood Frame</i> com lã de vidro e câmara de ar - WFb</b>				
$R_T$	$U$	$C_T$	$FS_o$	$\varphi$
[(m <sup>2</sup> .K)/W]	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	[%]	[horas]
1,541	0,649	26,712	0,778	3,008
<b>Parede em <i>Wood Frame</i> com lã de vidro - WFc</b>				
$R_T$	$U$	$C_T$	$FS_o$	$\varphi$
[(m <sup>2</sup> .K)/W]	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[kJ/(m <sup>2</sup> .K)]	[%]	[horas]
2,069	0,483	27,006	0,580	3,574

Na sequência são apresentados gráficos para melhor visualização dos resultados dos cálculos das propriedades térmicas citadas anteriormente. Para a Zona Bioclimática 3, os valores recomendados da transmitância térmica ( $U$ ), capacidade térmica ( $C_T$ ) pela NBR 15575-1 (ABNT, 2013a) e os valores do atraso térmico ( $\varphi$ ) e fator solar ( $FS_o$ ), recomendados pela NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) são indicados na cor verde.

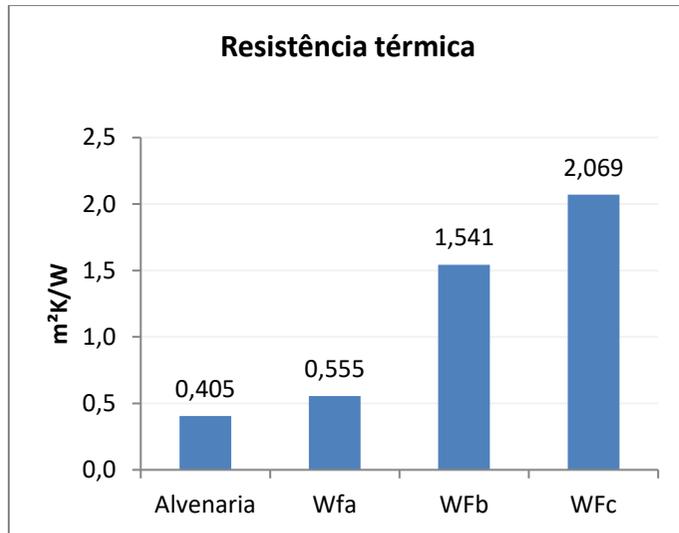


Figura 32. Resultados da Resistência térmica.

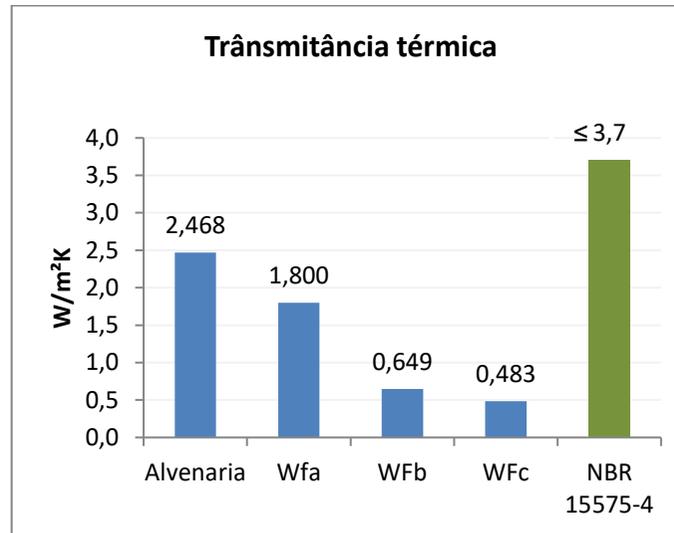


Figura 33. Resultados da Transmitância térmica.

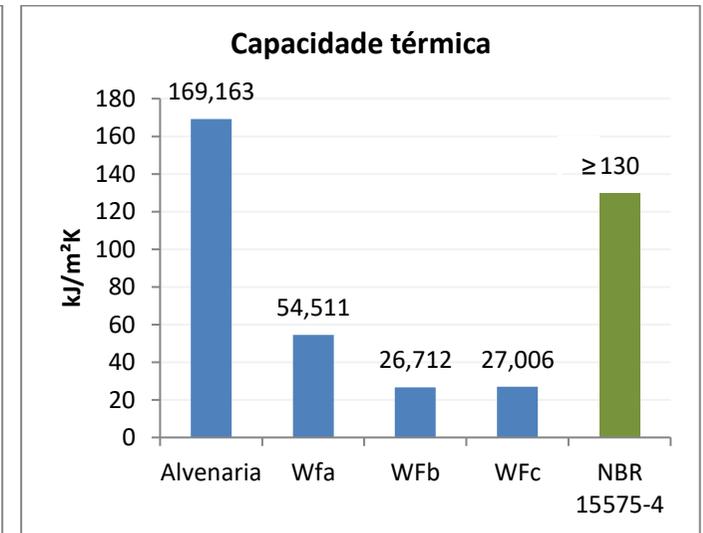


Figura 34. Resultados da Capacidade térmica.

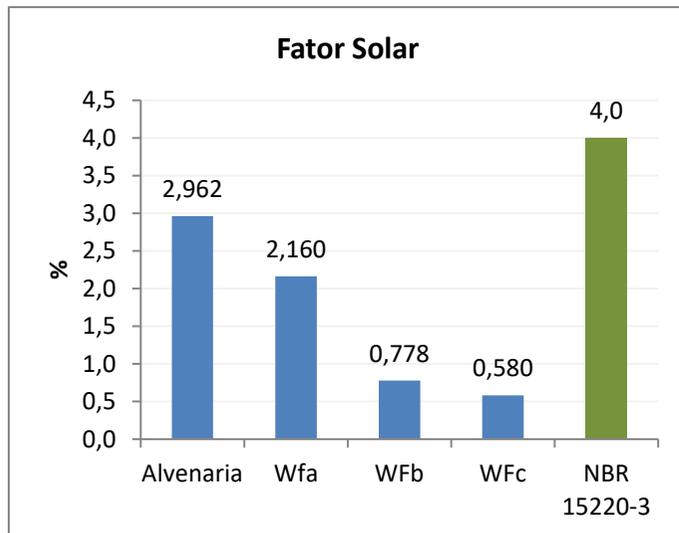


Figura 35. Resultados do Fator solar.

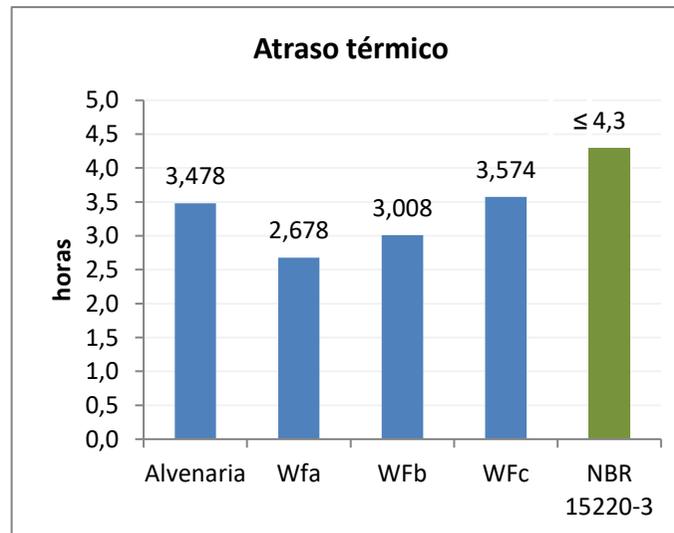


Figura 36. Resultados do Atraso térmico.

**Nota:**

- Alvenaria:** Corresponde a parede de alvenaria em tijolo cerâmico;
- Wfa:** Corresponde a parede em *Wood Frame* com câmara de ar não ventilada;
- WFb:** Corresponde a parede em *Wood Frame* com lâ de vidro e câmara de ar;
- WFc:** Corresponde a parede em *Wood Frame* com lâ de vidro.

Nota-se que a resistência térmica, que é a propriedade do material em resistir à passagem de calor e que depende da espessura e condutividade do material, é maior para as configurações da parede em *Wood Frame*, quando comparadas a parede de alvenaria. A parede com o núcleo em lã de vidro apresenta uma resistência térmica 5 vezes maior do que a parede em alvenaria. A resistência térmica é maior para a parede em *Wood Frame* devido à baixa condutividade térmica dos materiais que constituem os painéis, pois, quanto menor for a condutividade térmica de um material, menor será a quantidade de calor transferida entre as suas superfícies e melhor isolante térmico será o material. Enquanto na parede de alvenaria a condutividade térmica é da ordem de  $\lambda=1,15 \text{ W/mK}$  e  $\lambda=0,9 \text{ W/mK}$  para reboco e tijolo cerâmico respectivamente, na parede em *Wood Frame* os valores de condutividade térmica são da ordem de  $\lambda=0,15 \text{ W/mK}$  para o pinus (montantes) e  $\lambda=0,045 \text{ W/mK}$  para a lã de vidro, por exemplo. Além da presença de materiais isolantes, outro fator que contribui para a elevada resistência térmica dos painéis é a presença de câmaras de ar.

A transmitância térmica do material é o inverso da resistência térmica total e permite avaliar o comportamento de um fechamento opaco frente à transmissão de calor, pois, indica a capacidade do material em ser atravessado pelo calor. A NBR 15575-4 (ABNT, 2013a) indica que, para o cumprimento do desempenho térmico as paredes da Zona Bioclimática 3, as vedações verticais devem apresentar a transmitância térmica  $U \leq 3,7 \text{ W/m}^2\text{K}$  e todas as paredes cumprem com esse requisito. As configurações da parede de *Wood Frame* apresentaram valores de transmitância térmica menor do que a parede de alvenaria. Isso se dá pelo fato de que as resistências dos painéis em *Wood Frame* são maiores. O fato de a transmitância térmica ser menor para os painéis em *Wood Frame* significa que a quantidade de calor que atravessa o fechamento do painel é menor quando comparado à alvenaria.

A capacidade térmica depende da espessura ( $e$ ), densidade de massa aparente ( $\rho$ ) e calor específico ( $c$ ) do material e indica a maior ou menor capacidade do material em reter calor e a partir do seu valor pode-se avaliar, o quando um material pode contribuir em termos de inércia térmica para um ambiente. Os painéis em *Wood Frame* apresentam baixa inércia térmica, determinada pela existência de componentes de elevada resistência térmica e baixa capacidade térmica, por se tratar de painéis com materiais leves em sua composição. A NBR 15575-4 (ABNT, 2013a) indica que para o cumprimento do desempenho térmico as paredes da Zona Bioclimática 3, as vedações verticais devem apresentar a capacidade térmica  $C_T > 130 \text{ kJ/m}^2\text{K}$ , porém, apenas a parede de alvenaria cumpre esse requisito devido elevada densidade de massa aparente e espessura dos materiais que a compõem. No caso dos painéis em *Wood Frame*, os mesmos são compostos por materiais de baixa espessura e densidade de massa aparente, resultando em uma capacidade térmica máxima de

$C_T = 54,511 \text{ kJ/m}^2\text{K}$  para a parede composta por câmara de ar. De acordo com o procedimento da NBR 15575-1 (ABNT, 20013a), caso a vedação vertical não atenda aos requisitos mínimos, é necessário aplicar o método de simulação computacional, considerando a edificação como um todo. Porém, para o presente trabalho essa não foi a proposta de análise, pois, trata-se do estudo apenas do painel e não há um protótipo para a análise da edificação como um todo para comparação aos resultados da simulação computacional.

O fator solar depende da transmitância térmica ( $U$ ) e da absorvância à radiação solar ( $\alpha$ ) (para o presente estudo foi utilizada  $\alpha = 0,3$ , correspondente a cor clara) e representa a razão da quantidade de energia solar que atravessa o fechamento pela quantidade que nele incide. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) indica que, para a Zona Bioclimática 3, as paredes devem apresentar Fator solar  $FS_o \leq 4,0$  e todas as paredes cumprem com esse requisito. Os painéis em *Wood Frame* apresentam valores de Fator Solar menores do que o da parede em alvenaria, o que significa que a quantidade de energia solar que penetra no interior da parede em *Wood Frame* é menor do que a quantidade de energia solar que penetra a parede de alvenaria. No caso do painel com núcleo em lã de vidro, o fator solar é  $FS_o = 0,580 \%$  e o da alvenaria é  $FS_o = 2,962 \%$ . Para esse caso, o painel apresenta um fator solar 5 vezes menor do que o fator solar da alvenaria.

Na prática, o atraso térmico representa o tempo em que o fluxo de calor leva para alcançar a parte interna do fechamento. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), indica que para a Zona Bioclimática 3, as paredes devem apresentar atraso térmico  $\phi \leq 4,3$  horas e todas as paredes cumprem esse requisito. Apenas a parede com núcleo em lã de vidro apresenta atraso térmico maior que o da alvenaria, esse aumento deve-se à alta resistência térmica da parede oferecida pela lã de vidro.

### 7.3. Simulações Computacionais

As simulações computacionais foram executadas no Software THERM 7.4 e o procedimento foi apresentado anteriormente na metodologia do presente trabalho. Na sequência, apresentam-se os resultados da simulação.

#### 7.3.1 Cálculo das propriedades térmicas pela simulação computacional

Nas **Tabelas 21** e **22** apresentam-se os resultados da resistência térmica ( $R_T$ ), transmitância térmica ( $U$ ), Fluxo de calor ( $Q$ ) e Fluxo térmico ( $q$ ), gerados pela simulação no programa THERM. Para a condição de contorno de inverno foi utilizada a temperatura externa

$T_{e,mín} = 9,2^{\circ}\text{C}$  e temperaturas internas  $T_{i,mín} = 12,2^{\circ}\text{C}$  (nível M),  $T_{i,mín} = 14,2^{\circ}\text{C}$  (nível I),  $T_{i,mín} = 16,2^{\circ}\text{C}$  (nível S), que resultam em uma variação de temperatura ( $\Delta T$ ) de  $\Delta T = 3^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta T = 7^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. Para a condição de contorno de verão foi utilizada a temperatura externa  $T_{e,máx} = 33^{\circ}\text{C}$  e temperaturas internas  $T_{i,máx} = 32^{\circ}\text{C}$  (nível M),  $T_{i,máx} = 31^{\circ}\text{C}$  (nível I),  $T_{i,máx} = 29^{\circ}\text{C}$  (nível S), que resultam em uma variação de temperatura ( $\Delta T$ ) de  $\Delta T = 1^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta T = 2^{\circ}\text{C}$  e  $\Delta T = 4^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. As temperaturas internas foram determinadas a partir das recomendações da NBR 15575-1 (ABNT, 2013), pela necessidade de um gradiente de temperatura para a simulação, como comentado anteriormente.

**Tabela 21.** Resultados das propriedades térmicas calculadas pelo THERM 7.4.

<b>Parede de Alvenaria em tijolo cerâmico</b>						
Nível de Desempenho	<b>U</b>	<b>R<sub>T</sub></b>	<b>Q</b> Inverno	<b>q</b> Inverno	<b>Q</b> Verão	<b>q</b> Verão
	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[(m <sup>2</sup> .K)/W]	W	W/m <sup>2</sup>	W	W/m <sup>2</sup>
M	2,556	0,3912	11,502	7,668	3,8341	2,5561
I	2,5561	0,3912	19,171	12,7807	7,6683	5,1122
S	2,5561	0,3912	26,839	17,8927	15,337	10,2247
<b>Parede em Wood Frame com câmara de ar não ventilada - Wfa</b>						
Nível de Desempenho	<b>U</b>	<b>R<sub>T</sub></b>	<b>Q</b> Inverno	<b>q</b> Inverno	<b>Q</b> Verão	<b>q</b> Verão
	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[(m <sup>2</sup> .K)/W]	W	W/m <sup>2</sup>	W	W/m <sup>2</sup>
M	1,7879	0,5593	8,0456	5,3637	2,6819	1,7879
I	1,7879	0,5593	13,409	8,9393	5,3637	3,5758
S	1,7879	0,5593	18,773	12,5153	10,727	7,1513

**Tabela 22.** Resultados das propriedades térmicas calculadas pelo THERM 7.4.

Parede em Wood Frame com lã de vidro e câmara de ar - WFb						
Nível de Desempenho	U	R <sub>T</sub>	Q Inverno	q Inverno	Q Verão	q Verão
	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[(m <sup>2</sup> .K)/W]	W	W/m <sup>2</sup>	W	W/m <sup>2</sup>
M	0,6553	1,5261	2,9487	1,9658	0,9829	0,6553
I	0,6553	1,5261	4,9145	3,2763	1,9658	1,3105
S	0,6553	1,5261	6,8803	4,5869	3,9316	2,6211
Parede em Wood Frame com lã de vidro - WFc						
Nível de Desempenho	U	R <sub>T</sub>	Q Inverno	q Inverno	Q Verão	q Verão
	[W/(m <sup>2</sup> .K)]	[(m <sup>2</sup> .K)/W]	W	W/m <sup>2</sup>	W	W/m <sup>2</sup>
M	0,4811	2,0787	2,1648	1,4432	0,7216	0,4811
I	0,4811	2,0787	3,608	2,4053	1,4432	0,9621
S	0,4811	2,0787	5,0512	3,3675	2,8864	1,9243

Para melhor visualização, a **Figura 37** apresenta o fluxo de calor para a condição de nível mínimo para verão e inverno.

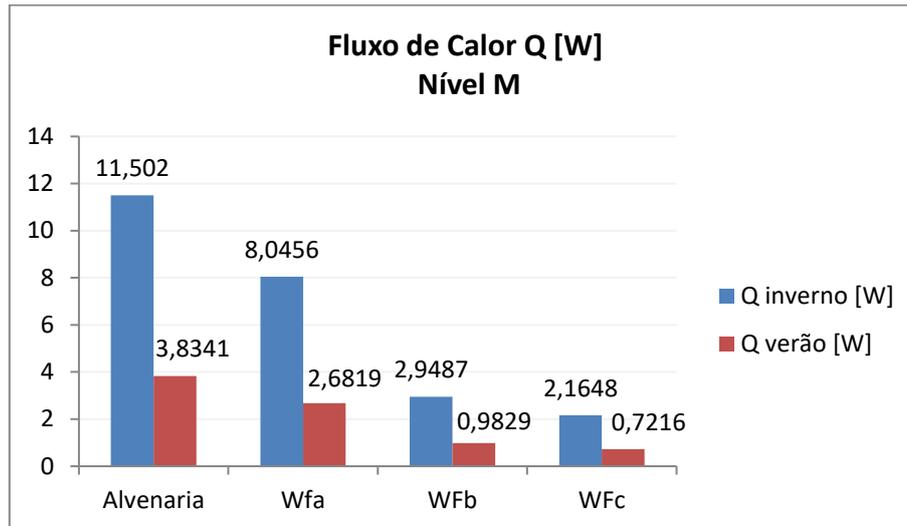


Figura 37. Comparação do Fluxo de calor entre as configurações de parede

Percebe-se que o fluxo de calor, que é a quantidade de energia em Watts [W] que atravessa um fechamento, é menor para as paredes em *Wood Frame* do que para a parede em alvenaria. Percebe-se ainda que o fluxo de calor é decrescente conforme a composição do núcleo da parede em *Wood Frame*, sendo menor para a parede com o núcleo em lã de vidro. No caso da parede com o núcleo em lã de vidro, o fluxo de calor é 5 vezes menor do que o da parede de alvenaria.

Quanto a análise dos valores de Resistência e Transmitância térmica, para validação da simulação, as Figuras 38 e 39 apresentam a comparação entre os valores da Resistência e Transmitância térmica calculados pelo procedimento da NBR 15220-2 (ABNT, 2005a) e os valores calculados pelo THERM, onde é notável a proximidade entre os valores obtidos.

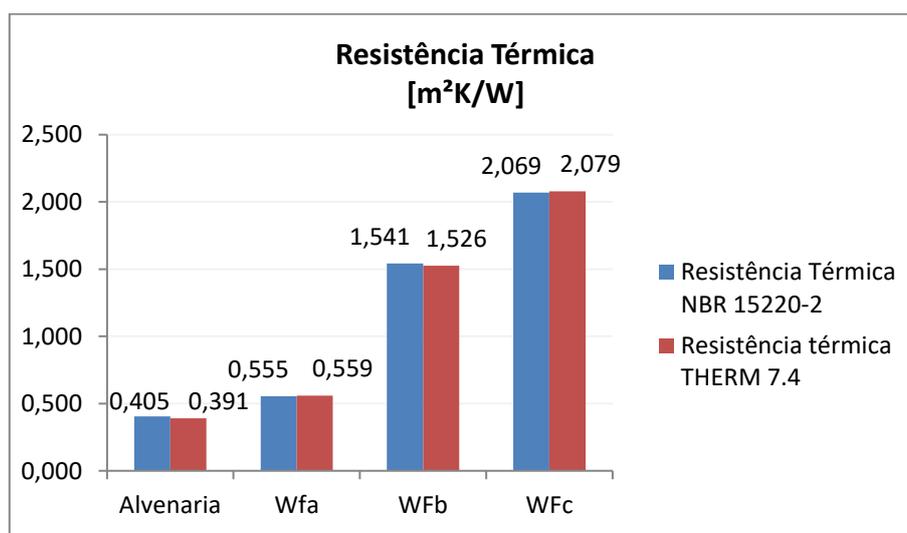
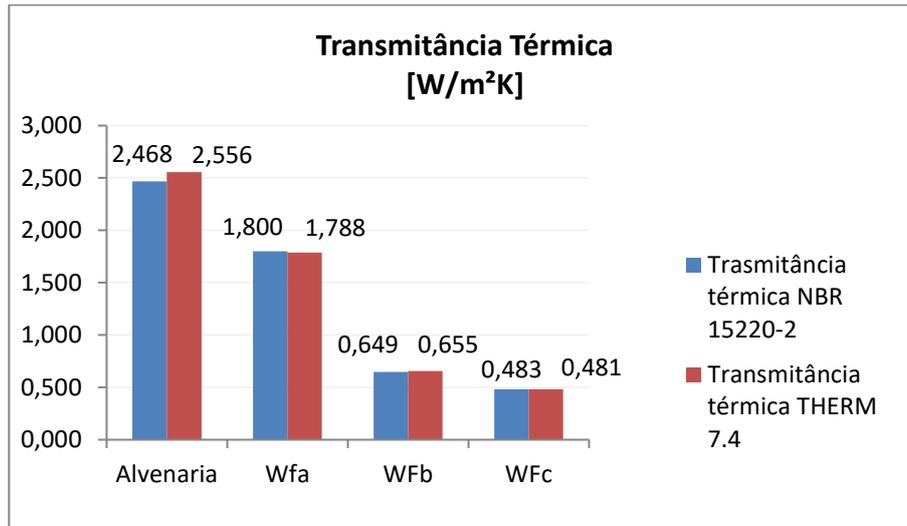


Figura 38. Comparação da resistência térmica calculada pela NBR 15220-2 e pelo THERM 7.4.



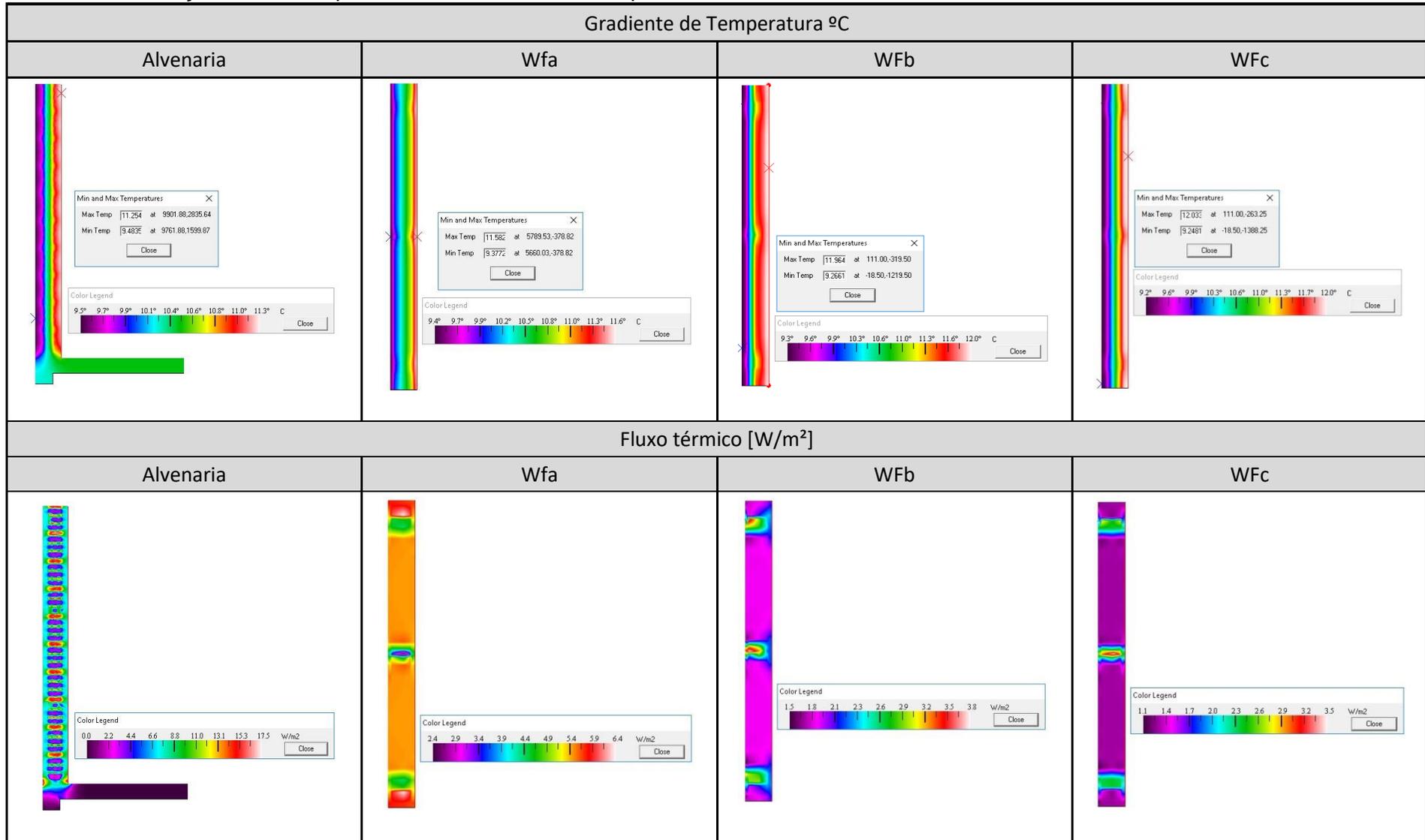
**Figura 39.** Comparação da transmitância térmica calculada pela NBR 15220-2 e pelo THERM 7.4.

### 7.3.2. Resultados das Simulações Computacionais

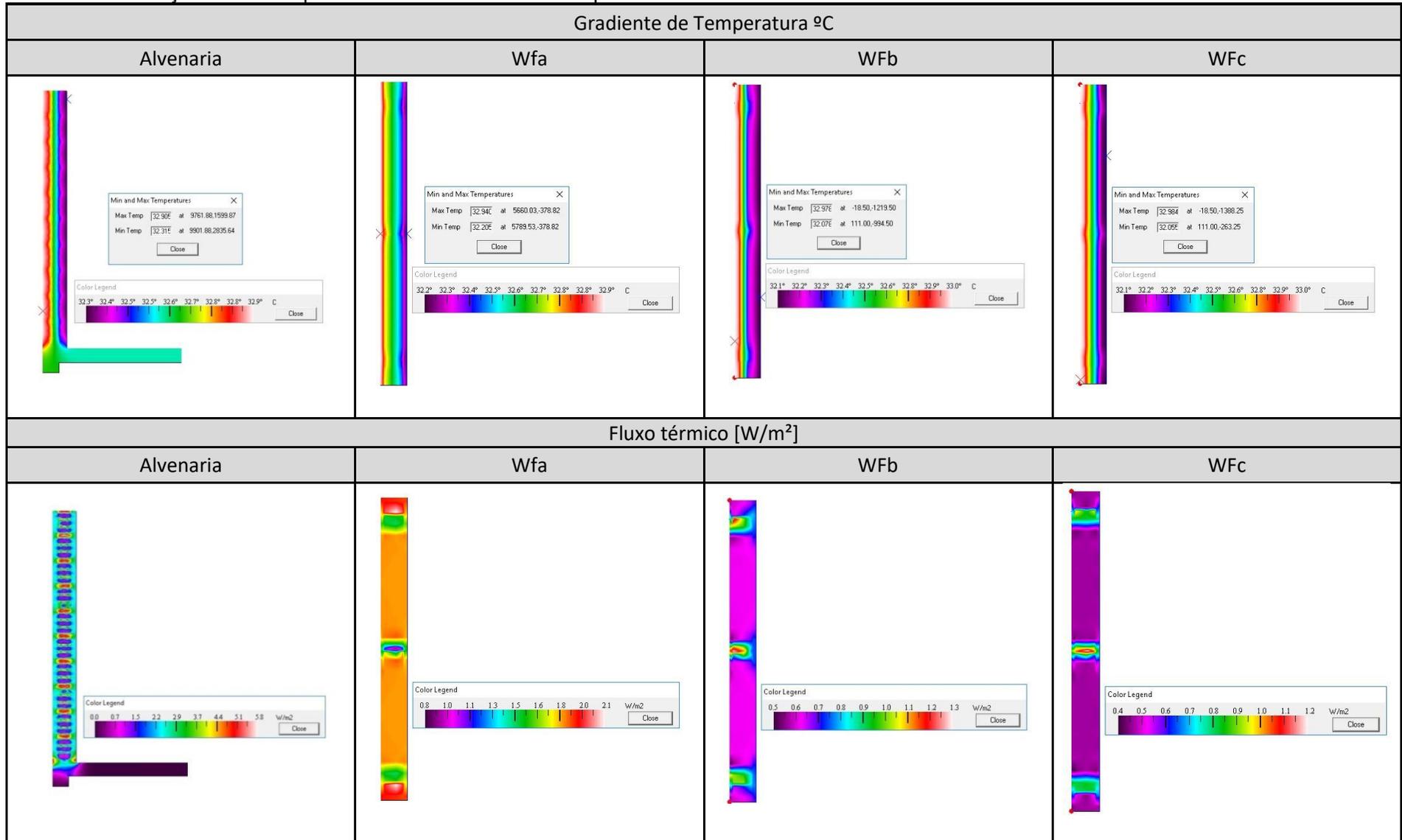
As simulações foram realizadas para os níveis de desempenho mínimo, intermediário e superior, considerando os gradientes de temperatura apresentados anteriormente. Porém, para a visualização do comportamento térmico das paredes são apresentados apenas os gráficos referentes ao desempenho térmico mínimo (exigido) para as condições de inverno e verão das configurações das paredes, pois o comportamento da parede é o mesmo para os níveis de desempenho, o que varia são os valores de fluxo de calor e fluxo térmico, que foram anteriormente apresentados nas **Tabelas 21 e 22**.

Desta forma, o **Quadro 4** apresenta os gráficos referentes a análise das distintas configurações de paredes para o desempenho mínimo de inverno considerando  $T_{e,mín} = 9,2^{\circ}\text{C}$  e  $T_{i,mín} = 12,2^{\circ}\text{C}$ . O **Quadro 5** apresenta os gráficos referentes a análise para o desempenho mínimo de verão considerando  $T_{e,máx} = 33^{\circ}\text{C}$  e  $T_{i,máx} = 32^{\circ}\text{C}$ . Nota-se que o lado esquerdo das figuras representa o ambiente exterior e o lado direito representa o ambiente interior. Apenas por convenção **Alvenaria**: Corresponde a parede de alvenaria em tijolo cerâmico; **Wfa**: Corresponde a parede em *Wood Frame* com câmara de ar não ventilada; **WFb**: Corresponde a parede em *Wood Frame* com lã de vidro e câmara de ar e **Wfc**: Corresponde a parede em *Wood Frame* com lã de vidro.

**Quadro 4.** Condição de Inverno para o nível mínimo de desempenho.



**Quadro 5.** Condição de Verão para o nível mínimo de desempenho.



Lembrando que:

**Alvenaria:** Corresponde a parede de alvenaria em tijolo cerâmico;

**WFa:** Corresponde a parede em Wood Frame com câmara de ar não ventilada;

**WFb:** Corresponde a parede em Wood Frame com lã de vidro e câmara de ar;

**WFc:** Corresponde a parede em *Wood Frame* com lã de vidro.

Em um fechamento opaco a transmissão de calor ocorre quando há uma diferença de temperatura entre a superfície interior e exterior e o sentido do fluxo de calor ocorre da maior temperatura para a menor temperatura. Através gráficos apresentados no **Quadro 4** e no **Quadro 5** referente à variação de temperatura, no inverno e verão, respectivamente, percebe-se a variação das temperaturas no fechamento, onde para situação de inverno, a temperatura interior está mais elevada que a exterior e na situação de verão ocorre o contrário, a temperatura exterior está mais elevada que a temperatura interior e é através dessas diferenças de temperaturas que ocorre a transmissão de calor.

Tanto para o inverno quanto para o verão, o gradiente de temperatura (variação de temperatura) é uniforme para as soluções de alvenaria, Wfa (parede em *Wood Frame* com câmara de ar não ventilada) e WFc (parede em *Wood Frame* com lã de vidro). Já a parede WFb (parede em Wood Frame com lã de vidro e câmara de ar) do exterior a aproximadamente no meio do painel, as temperaturas são mais elevadas.

Através dos gráficos apresentados no **Quadro 4** e no **Quadro 5** referente ao fluxo térmico para o inverno e verão, percebe-se que a quantidade de fluxo térmico que atravessa a parede, tanto para a condição de verão quanto para a de inverno é menor para as paredes de *Wood Frame* em relação à parede de alvenaria. A redução da quantidade de calor que atravessa as paredes em *Wood Frame* é proporcionada pela utilização de câmara de ar e isolante térmico, nesse caso a lã de vidro, já que as paredes com essas configurações apresentam resistências térmicas elevadas.

Como a resistência térmica é maior para as paredes em *Wood Frame*, devido à baixa condutividade térmica das camadas constituintes, os resultados das simulações comprovam os menores valores para o fluxo térmico ( $W/m^2$ ), tanto para verão quanto para inverno, principalmente para o painel WFb (parede em *Wood Frame* com lã de vidro e câmara de ar) e WFc (parede em *Wood Frame* com lã de vidro).

Ao comparar uma parede de tijolos com uma parede leve, como é o caso das paredes analisada, tem-se que uma parede de tijolos apresenta maior massa, fazendo com que ocorra um comportamento térmico de inércia, ou seja, no verão, o tijolo retém calor durante todo o dia e à noite continua liberando calor lentamente para o interior da edificação, mantendo o ambiente aquecido e, conseqüentemente, aumentando a necessidade de

consumo de energia para resfriamento. Porém no inverno, auxiliará na manutenção do aquecimento do interior, uma vez que continuará liberando calor lentamente para o interior.

Os painéis em *Wood Frame*, por serem compostos por materiais leves, apresentam baixa inércia térmica, determinada pela existência de componentes de elevada resistência térmica e baixa capacidade térmica. As camadas de materiais leves, com baixa densidade e porosos, apresentam a capacidade de reduzir a transferência de calor pelo fato do ar no interior desses poros terem baixa condutividade térmica ( $\lambda$ ). Esse aspecto ocorre da mesma forma quando se tem uma câmara de ar interna no interior de paredes. Isso pode explicar o fato do fluxo térmico ( $W/m^2$ ) aumentar nos componentes estruturais dos painéis, constituídos em madeira maciça e menos porosos. O mesmo ocorre nos pontos da alvenaria onde estão localizadas as camadas maciças dos tijolos.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo desse trabalho foi oferecer um maior número de informações técnicas sobre o sistema *Wood Frame* e incentivar o uso do mesmo na produção de habitação social no Brasil, pois foi observada a necessidade de maior inovação tecnológica no cenário da construção civil brasileira. Os objetivos de comparação do desempenho térmico entre o painel usual em *Wood Frame* e a parede de alvenaria, analisados pelo procedimento simplificado da NBR 15220-2 (ABNT, 2005a) e através da simulação computacional foram cumpridos.

De forma geral, os painéis em *Wood Frame* apresentaram um bom desempenho térmico, quando comparados à alvenaria, principalmente nas propriedades de resistência e transmitância térmica. Como observado, a madeira possui baixa condutividade térmica e a utilização das câmaras de ar e isolantes térmicos, nesse caso a lã de vidro, reduzem ainda mais a passagem de calor no painel em comparação à alvenaria. Apesar da propriedade de capacidade térmica não ter atendido ao requisito mínimo estabelecido pela NBR 15575-4 (ABNT, 2013b), acredita-se que o *Wood Frame* pode ser sim uma opção viável na produção de habitação social em Foz do Iguaçu, por ser um sistema consolidado em países de primeiro mundo e por apresentar muitas vantagens quando comparado aos sistemas convencionais, seja na redução do tempo de execução, redução de desperdícios, elevado controle de qualidade, baixo consumo energético para a produção da matéria prima, que por sua vez provém de fonte renovável, quando comparado aos demais sistemas empregados na construção civil atualmente. Ressalta-se que o *Wood Frame* por ser um sistema inovador ainda não possui normas regulamentadoras e isso dificulta a análise, visto que as considerações da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) no requisito de capacidade térmica atendem apenas aos sistemas convencionais.

Sugere-se a necessidade de revisão, para maior coerência de resultados, das recomendações da NBR 15575-4 (ABNT, 2013b) e NBR 15220-3 (ABNT, 2005b). Pois, as recomendações da NBR 15575-4 (ABNT, 2013), por exemplo, apresentam os valores especificados de condutividade térmica, onde apenas as paredes pesadas atendem a esses requisitos e nas recomendações da NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) consta que, para a Zona Bioclimática 3, as paredes externas devem ser leves refletoras, cumprindo os valores de  $U \leq 3.6 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $F_{So} \leq 4\%$  e  $\phi \leq 4,3$  horas.

Para o emprego de vedações verticais adequadas é fundamental verificar as características climáticas de cada região. É importante obter as características das mesmas em relação à transmissão de calor, como analisado no presente trabalho. Diante desse aspecto, ao ser utilizado um tipo de vedação vertical, cabe ao profissional especificá-lo de forma a evitar ganhos excessivos no verão e perdas durante o inverno, de forma a contribuir com a eficiência energética das construções.

Para enriquecer o conhecimento sobre o sistema, recomenda-se para trabalhos futuros a execução da simulação computacional mais detalhada de uma habitação padrão para Foz do Iguaçu, de preferência com variação de número de pavimentos (térrea e dois pavimentos), considerando a edificação como um todo, com base nas recomendações climáticas da cidade de Foz do Iguaçu – PR, bem como e verificar a possibilidade de execução de um protótipo real, com vedações verticais na composição dos painéis estudados para medições *in loco* das condições de conforto térmico (monitoramento de temperatura, umidade, etc) e, além disso, condições de conforto acústico, também de grande importância, tendo em vista os problemas correntes de transmissão de ruído observados com o uso de sistemas destinados à habitação de interesse social.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WOOD COUNCIL (AWC). **Details for conventional *Wood Frame Construction***. 2001. Disponível em: <http://www.awc.org/pdf/codes-standards/publications/wcd/AWC-WCD1-ConventionalWoodFrame-ViewOnly-0107.pdf>. Acesso em: 28 Ago. 2015.

AMORIM, K. Minha Casa Minha Vida entrega o primeiro residencial do Paraná construído com *Wood Frame*. **Revista Técnica**, Março, 2015. Disponível em: <http://techne.pini.com.br/engenharia-civil/obras/minha-casa-minha-vida-entrega-o-primeiro-residencial-do-parana-341265-1.aspx>. Acesso em 20 Nov. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT): NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e de componentes de edificações. Rio de Janeiro: 2005a.

\_\_\_\_\_ (ABNT). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: 2005b.

\_\_\_\_\_ (ABNT). NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: 2013a.

\_\_\_\_\_ (ABNT). NBR 15575: Edificações habitacionais – Desempenho. Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas - SVVIE. Rio de Janeiro: 2013b.

BONDUKI, N. **Origens da habitação social no Brasil**: arquitetura moderna, Lei do inquilinato e difusão da casa própria. São Paulo: Estação Liberdade, 2011.

BONDUKI, N. Política habitacional e inclusão social no Brasil: revisão histórica e novas perspectivas no governo Lula. **Revista Eletrônica de Arquitetura e Urbanismo arq.urb**, São Paulo, n.1, 2008. Disponível em: [http://www.usjt.br/arq.urb/numero\\_01/artigo\\_05\\_180908.pdf](http://www.usjt.br/arq.urb/numero_01/artigo_05_180908.pdf). Acesso em: 23 Set. 2015.

BOTEGA, L. R. A política habitacional no Brasil (1930-1990). **Periódico de Divulgação Científica da FALS**, São Paulo, Ano I – Nº 02 - Março de 2008. Disponível em: <http://www.fals.com.br/revela9/politicahabitacional.pdf>. Acesso em: 23 Set. 2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Habitação. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas. **Diretriz SINAT nº 005 – Revisão 1- Diretriz para Avaliação Técnica de Sistemas construtivos estruturados com peças de madeira maça serrada, com fechamentos de chapas delgadas. (Sistemas leves tipo “Light Wood Framing”)**. 2016. Disponível em: [http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp.h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php). Acesso em: 21 Set. 2016.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL (CEF). **Sobre a caixa**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/sobre-a-caixa/apresentacao/Paginas/default.aspx>. (2016a).

Acesso em: 17 Set. 2016.

\_\_\_\_\_ (CEF). **O Minha Casa Minha Vida transformou a vida de +9 milhões de brasileiros**. Disponível em: <http://maiscasamaisvida.com.br/noticia/258-O-Minha-Casa-Minha-Vida-transformou-a-vida-de-9-milhoes-de-brasileiros>. (2016b). Acesso em: 17 Set. 2016.

\_\_\_\_\_ (CEF). **No Minha Casa Minha Vida não faltam moradias de qualidade e empregos**. Disponível em: <http://maiscasamaisvida.com.br/noticia/252-No-Minha-Casa-Minha-Vida-nao-faltam-moradias-de-qualidade-e-empregos>. (2016c). Acesso em: 17 Set. 2016c.

\_\_\_\_\_ (CEF). **Minha Casa Minha Vida**. Disponível em: <http://www.caixa.gov.br/voce/habitacao/minha-casa-minha-vida/Paginas/default.aspx>. (2016d).

Acesso em: 17 Set. 2016.

CALIL JR, C.; LAHR, F. A. R.; BRAZOLIN, S. Capítulo 34: Madeiras na Construção Civil. **Materiais de Construção Civil e princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. Ed. G. C. Isaia, São Paulo: IBRACON, 2v, 2007.

CANADA MORTGAGE AND HOUSING CORPORATION (CMHC). **Canadian Wood-Frame House Construction**. 1967 revised 2014. Disponível em: <http://www.cmhc-schl.gc.ca/odpub/pdf/61010.pdf?fr=1441661380783>. Acesso em: 29 Ago. 2015.

CONSULSTEEL. **Construcción com acero liviano: Manual de procedimiento**. 2008. Buenos Aires, Argentina. Disponível em: [http://www.latu.org.uy/docs/licitacion29515/Manual\\_d\\_e\\_Procedimiento\\_-\\_Consul\\_Steel.pdf](http://www.latu.org.uy/docs/licitacion29515/Manual_d_e_Procedimiento_-_Consul_Steel.pdf). Acesso em 23 de Nov. 2015.

COSTA, E. C. **Física aplicada à construção: Conforto térmico**. 4ª ed. São Paulo. Edgar Blucher, 1991.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Centro de Estatística e Informações. Déficit habitacional no Brasil 2011-2012. Belo Horizonte, 2015. 126p.+ *CD-Rom*: il. Disponível em: [http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Publicacoes/capacidade/publicacoes/deficit\\_habitacional\\_2011-2012.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNH/ArquivosPDF/Publicacoes/capacidade/publicacoes/deficit_habitacional_2011-2012.pdf). Acesso em: 17 Set. 2015.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO (FJP). Centro de Estatística e Informações. Déficit habitacional no Brasil 2013-2014. Belo Horizonte, 2016. 92p.+ *CD-Rom*: il. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/informativos-cei-eventuais/634-deficit-habitacional-06-09-2016/file>. Acesso em: 17 Set. 2016.

FERREIRA, R. MCMV de madeira. **Revista Construção Mercado**, edição 146, Setembro, 2013. Disponível em: <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/146/artigo299692-1.aspx>. Acesso em: 20 Nov. 2015.

GIRIBOLA, M. Habitação popular em madeira. **Revista Equipe de Obra**, edição 62, Agosto, 2013. Disponível em: <http://equipededeobra.pini.com.br/construcao-reforma/62/habitacao-popular-em-madeira-construtora-reduziu-em-15-o-292701-1.aspx>.

Acesso em: 20 Nov. 2015.

HOLTZ, F. Sistema Wood Frame se prepara para avançar no mercado brasileiro. **Revista Construção Mercado**, edição 183, Outubro, 2016. Disponível em: <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/183/sistema-wood-frame-se-prepara-para-avancar-no-mercado-brasileiro-372733-1.aspx>. Acesso

em: 23 Set. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990**. (2016). Disponível em:

<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 20. Nov. 2016.

LAMBERTS, R., DUTRA, L., PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3ª ed. São Paulo, PW, 1997.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY (LBNL). **THERM 6.3/ WINDOW 6.3 NFRC Simulation Manual**. (2011). Disponível em:

<https://windows.lbl.gov/software/NFRC/SimMan/NFRCSim6.3-2013-07-Manual.pdf>. Acesso em: 20 Nov. 2016.

LUKIANCHUKI, J. A. Levantamento fotográfico. Banff, Canadá. 2015.

MARTINS, E. T. R. **Caracterização de Sistemas de Reabilitação de Fachadas: Soluções Existentes e Inovadoras**. Dissertação (Mestrado em Construção e Reabilitação Sustentáveis) – Universidade do Minho, 2013. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28123/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o\\_Elsa%20Martins\\_Dez2013.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/28123/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Elsa%20Martins_Dez2013.pdf). Acesso em: 11 Nov.2015.

MOLINA, J. C.; JUNIOR, C. C. Sistema construtivo em *Wood Frame* para casas de madeira. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v.31, n.2, p. 143-156, jul./dez. 2010. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/semexatas/article/viewFile/4017/6906>. Acesso em: 27 Ago. 2015.

MORAES, P. T. A.; LIMA, M. G. Levantamento e análise de processos construtivos industrializados sob a ótica da sustentabilidade e desempenho. In: Encontro de Iniciação Científica e Pós-graduação do ITA, 2009. São José dos Campos. **Anais do 15º Encontro de Iniciação Científica e Pós-Graduação do ITA – XV ENCITA**, São José dos Campos: ITA, 2009.

NAKAMURA, J. Minha Casa na Mira. **Revista Construção Mercado**, Edição 132, julho, 2012. Disponível em: <http://construcaomercado.pini.com.br/negocios-incorporacao-construcao/132/artigo284024-1.aspx>. Acesso em: 20 Nov. 2015.

NASCIMENTO, D. M.; BRAGA, R. C. Q. Déficit Habitacional: um problema a ser resolvido ou um lição a ser aprendida? . **RISCO- Revista de pesquisa em arquitetura e urbanismo**, Programa de Pós-graduação do departamento de Arquitetura e Urbanismo da EESC-USP, n.9, 1º sem 2009. Disponível em: [http://www.arg.ufmg.br/praxis/textos/deficit\\_Morado\\_Braga.pdf](http://www.arg.ufmg.br/praxis/textos/deficit_Morado_Braga.pdf). Acesso em: 23 Set. 2015.

ORDENES, M., LAMBERTS, R., GÜTHS, S. **Transferência de calor na envolvente da edificação**. Programa de Pós-graduação em engenharia Civil – PPGE/UFSC. Florianópolis, 2008. Disponível em: [http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila\\_08.pdf](http://www.labee.ufsc.br/sites/default/files/disciplinas/Apostila_08.pdf). Acesso em: 10 Nov. 2016.

Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H). 2015. **DATec nº 20-A: Sistema de vedação vertical leve em madeira**. Sistema Nacional de Avaliações Técnicas - SINAT. Disponível em: [http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos\\_sinat.php](http://pbqp-h.cidades.gov.br/projetos_sinat.php). Acesso em: 20 Jun. 2016.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural**. 1ª ed. Porto Alegre, D. C. Luzzatto Editores, 1985.

RORIZ, M. **ZBBR. Versão 1.1.** Universidade Federal de São Carlos, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações - LABEEE. São Carlos, 2004. Disponível em: <http://www.labee.ufsc.br/downloads/software/zbbbr>. Acesso em: 10 Nov. 2016.

SÁ JÚNIOR, A. **Aplicação da classificação de Köppen para o zoneamento climático do Estado de Minas Gerais.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras. Lavras, julho de 2009.

SACHT, H. M. **Painéis de vedação de concreto moldados *in loco*: avaliação de desempenho térmico e desenvolvimento de concretos.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, 2008. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18141/tde-17102008-114925/pt-br.php>. Acesso em: 27 Ago. 2015.

TERVERDE. **Tecverde apresenta 1º prédio construído em tecnologia sustentável industrializada no Brasil.** (2016a). Disponível em: <http://www.tecverde.com.br/2016/08/26/tecverde-apresenta-1o-predio-construido-em-tecnologia-sustentavel-industrializada-do-brasil/>. Acesso em 01 Out. 2016.

TECVERDE. **Portfólio.** (2016b) Disponível em: <http://www.tecverde.com.br/portfolio/>. Acesso em 09 Out. 2016.

TURISMO PARANÁ. **Clima de Foz do Iguaçu.** Disponível em: <http://www.turismo.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=214>. Acesso em 24 Out. 2016.

WERNER, E. et al. **Pluralismo na habitação.** São Paulo: Annablume, 2001.

## **APÊNDICES**

## APÊNDICE I - Cálculo das propriedades da parede de alvenaria (Alvenaria) pelo procedimento da NBR 15220-2.

Dados:

Dimensões do tijolo cerâmico: 9cm x 14cm x 24cm.

Dimensões das câmaras de ar: 3cm x 3,33cm x 24cm

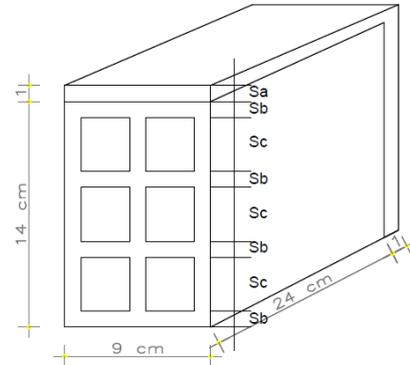
Espessura da argamassa de assentamento: 1cm.

Espessura do reboco = 2,5 cm.

$R_{ar} = 0,16 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$



$\lambda_{\text{cerâmica}} = 0,9 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{cerâmica}} = 1600 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{cerâmica}} = 0,92 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{argamassa}} = 1,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

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

$C_{\text{argamassa}} = 1,00 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{reboco}} = 1,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

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

$C_{\text{reboco}} = 1,00 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

### a) Resistência térmica da parede ( $R_t$ ):

Seção a: (reboco + argamassa + reboco)

$$A_a = (0,01 \times 0,24 + 0,01 \times 0,15) = 0,0039 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{argamassa}}}{\lambda_{\text{argamassa}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}}$$

$$R_a = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{1,15} + \frac{0,025}{1,15} = 0,122 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção b: (reboco + tijolo + reboco)

$$A_b = (0,01 \times 0,24) = 0,0024 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{tijolo}}}{\lambda_{\text{tijolo}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}}$$

$$R_b = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,09}{0,90} + \frac{0,025}{1,15} = 0,143 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção c: (reboco + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + reboco)

$$A_c = (0,033 \times 0,24) = 0,00792 \text{ m}^2$$

$$R_c = \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}} + \frac{e_{\text{tijolo}}}{\lambda_{\text{tijolo}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{tijolo}}}{\lambda_{\text{tijolo}}} + R_{ar} + \frac{e_{\text{tijolo}}}{\lambda_{\text{tijolo}}} + \frac{e_{\text{reboco}}}{\lambda_{\text{reboco}}}$$

$$R_c = \frac{0,025}{1,15} + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + 0,16 + \frac{0,01}{0,90} + \frac{0,025}{1,15} = 0,397 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Resistência térmica da parede:

$$R_t = \frac{A_a + 4A_b + 3A_c}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{4A_b}{R_b} + \frac{3A_c}{R_c}} = 0,235 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

### b) Resistência térmica total ( $R_T$ )

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 0,235 + 0,04 = 0,405 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

### c) Transmitância térmica ( $U$ )

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,405} = 2,468 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

### d) Capacidade térmica da parede ( $C_T$ )

Seção a (reboco + argamassa + reboco)

$$C_{Ta} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{argamassa}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}}$$

$$C_{Ta} = (0,025 \times 2000 \times 1,00) + (0,09 \times 2000 \times 1,00) + (0,025 \times 2000 \times 1,00)$$

$$C_{Ta} = 280,0 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Seção b (reboco + tijolo + reboco)

$$C_{Tb} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{tijolo}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}}$$

$$C_{Tb} = (0,025 \times 2000 \times 1,00) + (0,09 \times 1600 \times 0,92) + (0,025 \times 2000 \times 1,00)$$

$$C_{Tb} = 232,48 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Seção c: (reboco + tijolo + câmara de ar + tijolo + câmara de ar + tijolo + reboco)

Recomendações NBR 15220-2:

Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa  $\rho=1,2\text{kg/m}^3$ , sua capacidade térmica em componentes com câmara de ar pode ser desprezada.

Portanto:

$$C_{Tc} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{tijolo}} + (\cancel{e \cdot \rho \cdot c})_{\text{ar}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{tijolo}} + (\cancel{e \cdot \rho \cdot c})_{\text{ar}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{tijolo}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{reboco}}$$

$$C_{Tc} = (2 \times 0,025 \times 2000 \times 1,00) + (3 \times 0,01 \times 1600 \times 0,92)$$

$$C_{Tc} = 144,16 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica total:

$$C_T = \frac{A_a + 4A_b + 3A_c}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{4A_b}{C_{Tb}} + \frac{3A_c}{C_{Tc}}} = 169,163 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

### e) Atraso Térmico ( $\varphi$ )

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{T\text{ext}}}{R_t}, \text{ considerando } C_{\text{ext}} \text{ e } R_{\text{ext}} \text{ a camada de reboco, tem-se:}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{169,16 - 50}{0,235} = 114,59$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{\lambda \rho c_{\text{ext}}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{1,15 \times 2000 \times 1,00}{0,235} \right) \cdot \left( 0,022 - \frac{0,235 - 0,022}{10} \right) = -38,43$$

$B_2$  é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

$$\varphi = 1,382 \times 0,235 \sqrt{114,59} = 3,5 \text{ horas}$$

### f) Fator Solar (FS<sub>o</sub>)

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \times 2,47 \times 0,3 = 2,96\%$$

## APÊNDICE II - Cálculo das propriedades da parede de *Wood Frame* com câmara de ar (WFa) pelo procedimento da NBR 15220-2.

Dados:

Dimensões do módulo: 135mmx 1500mmx 638mm.

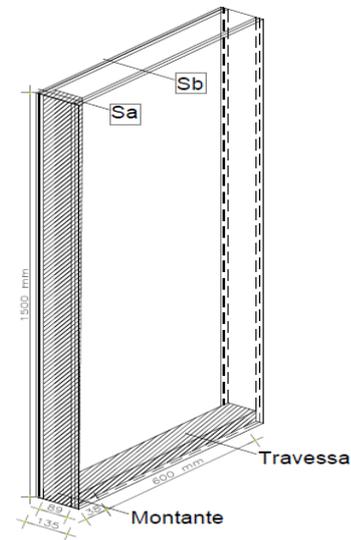
Dimensões da travessa: 89mmx 38mmx 600 mm.

Dimensões do montante: 89mmx 38mm x 600mm.

$R_{ar} = 0,17 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$



$\lambda_{\text{placa cimentícia}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{placa cimentícia}} = 1700 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{placa cimentícia}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{osb}} = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{osb}} = 650 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{osb}} = 2,3 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{membrana}} = 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{membrana}} = 910 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{membrana}} = 1,7 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{gesso}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{gesso}} = 1000 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{gesso}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{pinus}} = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{pinus}} = 600 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{pinus}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

### a) Resistência térmica da parede ( $R_t$ ):

Seção a: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso cartonado)

$$A_a = (0,038 \times 1,15 + 0,038 \times 0,6) = 0,080 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{placa}}}{\lambda_{\text{placa}}} + \frac{e_{\text{membrana}}}{\lambda_{\text{membrana}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{montante}}}{\lambda_{\text{montante}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_a = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,089}{0,15} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 0,792 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção b: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + câmara de ar + OSB + gesso cartonado)

$$A_b = (0,6 \times 1,464) = 0,877 \text{ m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{placa}}{\lambda_{placa}} + \frac{e_{membrana}}{\lambda_{membrana}} + \frac{e_{OSB}}{\lambda_{OSB}} + R_{ar} + \frac{e_{OSB}}{\lambda_{OSB}} + \frac{e_{gesso}}{\lambda_{gesso}}$$

$$R_b = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + 0,17 + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 0,368 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Resistência térmica da parede:

$$R_t = \frac{\frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}}} = 0,385 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

### b) Resistência térmica total ( $R_T$ )

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 0,385 + 0,04 = 0,555 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

### c) Transmitância térmica ( $U$ )

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0,555} = 1,80 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

### d) Capacidade térmica da parede ( $C_T$ )

Seção a (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso cartonado)

$$C_{Ta} = (e \cdot \rho \cdot c)_{placa} + (e \cdot \rho \cdot c)_{membrana} + (e \cdot \rho \cdot c)_{OSB} + (e \cdot \rho \cdot c)_{montante} + (e \cdot \rho \cdot c)_{OSB} + (e \cdot \rho \cdot c)_{gesso}$$

$$C_{Ta} = (0,008 \times 1700 \times 0,84) + (0,001 \times 910 \times 1,7) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,089 \times 600 \times 1,34) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Ta} = 123,43 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

Seção b (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + câmara de ar + OSB + gesso cartonado)

Recomendações da NBR 15220-2:

Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa  $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ , sua capacidade térmica em componentes com câmara de ar pode ser desprezada.

$$C_{Tb} = (e \cdot \rho \cdot c)_{placa} + (e \cdot \rho \cdot c)_{membrana} + (e \cdot \rho \cdot c)_{OSB} + \cancel{(e \cdot \rho \cdot c)_{ar}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{OSB} + (e \cdot \rho \cdot c)_{gesso}$$

$$C_{Tb} = (0,008 \times 1700 \times 0,84) + (0,001 \times 910 \times 1,7) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + 0 + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Tb} = 51,876 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica total:

$$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}}} = 54,51 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

### e) Atraso Térmico ( $\varphi$ )

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{T\text{ext}}}{R_t}, \text{ considerando } C_{\text{ext}} \text{ e } R_{\text{ext}} \text{ a camada da placa cimentícia, tem-se:}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{54,51 - (0,008 \times 1700 \times 0,84)}{0,385} = 25,29$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{\lambda \rho c_{\text{ext}}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{0,35 \times 1700 \times 0,84}{0,385} \right) \cdot \left( \frac{0,008}{0,35} - \frac{0,385 - 0,008}{10} \right) = -3,6$$

$B_2$  é desconsiderado pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

$$\varphi = 1,382 \times 0,385 \sqrt{25,29} = 2,678 \text{ horas}$$

### f) Fator Solar (FSo)

$$FSo = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FSo = 4 \times 1,80 \times 0,3 = 2,16\%$$

### APÊNDICE III - Cálculo das propriedades da parede de *Wood Frame* com câmara de ar e lã de vidro (WFb) pelo procedimento da NBR 15220-2.

Dados:

Dimensões do módulo: 135mmx 1500mmx 638mm.

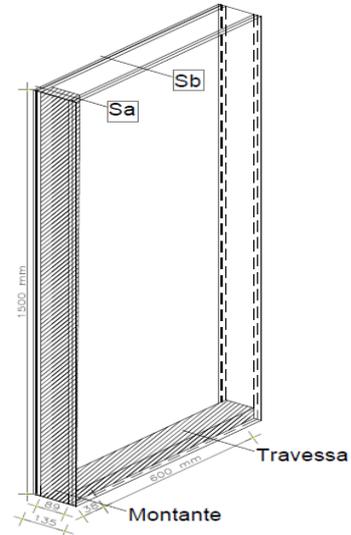
Dimensões da travessa: 89mmx 38mmx 600 mm.

Dimensões do montante: 89mmx 38mm x 600mm.

$$R_{ar} = 0,16 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

$$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

$$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$



$$\lambda_{\text{placa cimentícia}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{placa cimentícia}} = 1700 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{placa cimentícia}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

$$\lambda_{\text{osb}} = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{osb}} = 650 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{osb}} = 2,3 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

$$\lambda_{\text{membrana}} = 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{membrana}} = 910 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{membrana}} = 1,7 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

$$\lambda_{\text{gesso}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{gesso}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{gesso}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

$$\lambda_{\text{pinus}} = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{pinus}} = 600 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{pinus}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

$$\lambda_{\text{lã de vidro}} = 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$$

$$\rho_{\text{lã de vidro}} = 10,35 \text{ kg/m}^3$$

$$C_{\text{lã de vidro}} = 0,7 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$$

#### a) Resistência térmica da parede ( $R_t$ ):

Seção a: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso cartonado)

$$A_a = (0,038 \times 1,15 + 0,038 \times 0,6) = 0,080 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{placa}}}{\lambda_{\text{placa}}} + \frac{e_{\text{membrana}}}{\lambda_{\text{membrana}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{montante}}}{\lambda_{\text{montante}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_a = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,089}{0,15} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 0,792 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção b: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + lã de vidro + câmara de ar + OSB + gesso cartonado)

$$A_b = (0,6 \times 1,464) = 0,877\text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{placa}}}{\lambda_{\text{placa}}} + \frac{e_{\text{membrana}}}{\lambda_{\text{membrana}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{lã de vidro}}}{\lambda_{\text{lã de vidro}}} + R_{\text{ar}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_b = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,05}{0,045} + 0,16 + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 1,469 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Resistência térmica da parede:

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} = 1,371 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

### b) Resistência térmica total ( $R_T$ )

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 1,371 + 0,04 = 1,541 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

c) Transmitância térmica ( $U$ )

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1,541} = 0,649 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

### d) Capacidade térmica da parede ( $C_T$ )

Recomendações da NBR 15220-2:

No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a 0,065 W/mK e resistência térmica maior que 0,5 (m<sup>2</sup>K)/W, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar.

Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa  $\rho=1,2\text{kg/m}^3$ , sua capacidade térmica em componentes com câmara de ar pode ser desprezada.

Seção a (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso acartonado)

$$C_{Ta} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{montante}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{OSB}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{gesso}}$$

$$C_{Ta} = (0,089 \times 600 \times 1,34) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Ta} = 96,259 \text{ kJ/(m}^2\cdot\text{K)}$$

**Seção b** (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + lã de vidro + câmara de ar + OSB + gesso acartonado)

$$C_{Tb} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{lã de vidro}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{ar}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{OSB}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{gesso}}$$

$$C_{Tb} = (0,05 \times 10,35 \times 0,7) + 0 + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Tb} = 25,065 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica total:

$$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}}} = 26,712 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

### e) Atraso Térmico ( $\varphi$ )

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{\text{Text}}}{R_t}, \text{ considerando } C_{\text{Text}} \text{ e } R_{\text{ext}} \text{ a camada da placa cimentícia, tem-se:}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{26,712 - (0,008 \times 1700 \times 0,84)}{1,541} = 15,3$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{\lambda \rho c_{\text{ext}}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{0,35 \times 1700 \times 0,84}{1,541} \right) \cdot \left( \frac{0,008}{0,35} - \frac{1,541 - \frac{0,008}{0,35}}{10} \right) = -8,4$$

$B_2$  é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

$$\varphi = 1,382 \times 1,541 \cdot \sqrt{15,3} = 3,008 \text{ horas}$$

### f) Fator Solar (FSo)

$$FSo = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FSo = 4 \times 0,649 \times 0,3 = 2,16\%$$

## APÊNDICE IV - Cálculo das propriedades da parede de *Wood Frame* com lã de vidro (WFc) pelo procedimento da NBR 15220-2.

Dados:

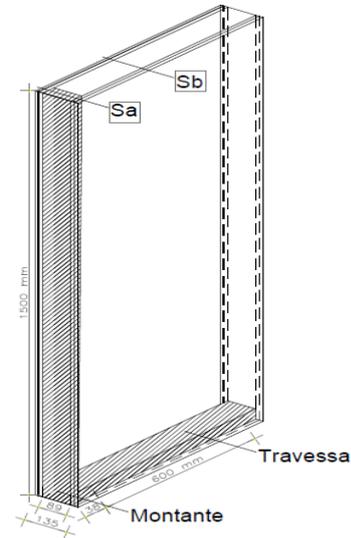
Dimensões do módulo: 135mmx 1500mmx 638mm.

Dimensões da travessa: 89mmx 38mmx 600 mm.

Dimensões do montante: 89mmx 38mm x 600mm.

$R_{si} = 0,13 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$

$R_{se} = 0,04 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$



$\lambda_{\text{placa cimentícia}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{placa cimentícia}} = 1700 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{placa cimentícia}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{osb}} = 0,14 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{osb}} = 650 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{osb}} = 2,3 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{membrana}} = 0,25 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{membrana}} = 910 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{membrana}} = 1,7 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{gesso}} = 0,35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{gesso}} = 1000 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{gesso}} = 0,84 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{pinus}} = 0,15 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{pinus}} = 600 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{pinus}} = 1,34 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

$\lambda_{\text{lã de vidro}} = 0,045 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$

$\rho_{\text{lã de vidro}} = 10,35 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{lã de vidro}} = 0,7 \text{ kJ/(kg}\cdot\text{m}^3)$

### a) Resistência térmica da parede ( $R_t$ ):

Seção a: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso cartonado)

$$A_a = (0,038 \times 1,15 + 0,038 \times 0,6) = 0,080 \text{ m}^2$$

$$R_a = \frac{e_{\text{placa}}}{\lambda_{\text{placa}}} + \frac{e_{\text{membrana}}}{\lambda_{\text{membrana}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{montante}}}{\lambda_{\text{montante}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_a = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,089}{0,15} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 0,792 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$$

Seção b: (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + lã de vidro + OSB + gesso cartonado)

$$A_b = (0,6 \times 1,464) = 0,877 \text{m}^2$$

$$R_b = \frac{e_{\text{placa}}}{\lambda_{\text{placa}}} + \frac{e_{\text{membrana}}}{\lambda_{\text{membrana}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{lã de vidro}}}{\lambda_{\text{lã de vidro}}} + \frac{e_{\text{OSB}}}{\lambda_{\text{OSB}}} + \frac{e_{\text{gesso}}}{\lambda_{\text{gesso}}}$$

$$R_b = \frac{0,008}{0,35} + \frac{0,001}{0,25} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,05}{0,045} + \frac{0,0095}{0,14} + \frac{0,0125}{0,35} = 2,176 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

Resistência térmica da parede:

$$R_t = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_b}} = 1,899 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

### b) Resistência térmica total ( $R_T$ )

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se}$$

$$R_T = 0,13 + 1,899 + 0,04 = 2,069 \text{ (m}^2\text{.K)/W}$$

### c) Transmitância térmica ( $U$ )

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{2,069} = 0,483 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$$

### d) Capacidade térmica da parede ( $C_T$ )

Recomendações da NBR 15220-2:

No caso de paredes que tenham na sua composição materiais isolantes térmicos de condutividade térmica menor ou igual a 0,065 W/mK e resistência térmica maior que 0,5 (m<sup>2</sup>K)/W, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se todos os materiais voltados para o ambiente externo, posicionados a partir do isolante ou espaço de ar.

Como o ar apresenta uma densidade de massa aparente muito baixa aprox. 1,2kg/m<sup>3</sup>, sua capacidade térmica pode ser desprezada.

Seção a (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + montante + OSB + gesso acartonado)

$$C_{Ta} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{montante}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{OSB}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{gesso}}$$

$$C_{Ta} = (0,089 \times 600 \times 1,34) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Ta} = 96,259 \text{ kJ/(m}^2\text{.K)}$$

**Seção b** (placa cimentícia + membrana hidrófuga + OSB + lã de vidro OSB + gesso acartonado)

$$C_{Tb} = (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{lã de vidro}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{OSB}} + (e \cdot \rho \cdot c)_{\text{gesso}}$$

$$C_{Tb} = (0,05 \times 10,35 \times 0,7) + (0,0095 \times 650 \times 2,3) + (0,0125 \times 1000 \times 0,84)$$

$$C_{Tb} = 25,347 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

Capacidade térmica total:

$$C_T = \frac{A_a + A_b}{\frac{A_a}{C_{Ta}} + \frac{A_b}{C_{Tb}}} = 27,006 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$$

### e) Atraso Térmico ( $\varphi$ )

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{B_0}{R_t}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{C_T - C_{T_{\text{ext}}}}{R_t}, \text{ considerando } C_{\text{text}} \text{ e } R_{\text{ext}} \text{ a camada da placa cimentícia, tem-se:}$$

$$B_1 = 0,226 \cdot \frac{27,006 - (0,008 \times 1700 \times 0,84)}{1,899} = 1,854$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{\lambda \rho c_{\text{ext}}}{R_t} \right) \cdot \left( R_{\text{ext}} - \frac{R_t - R_{\text{ext}}}{10} \right)$$

$$B_2 = 0,205 \cdot \left( \frac{0,35 \times 1700 \times 0,84}{1,899} \right) \cdot \left( \frac{0,008}{0,35} - \frac{1,899 - \frac{0,008}{0,35}}{10} \right) = -8,9$$

$B_2$  é desconsiderado, pois resultou em valor negativo.

$$\varphi = 1,382 \cdot R_t \cdot \sqrt{B_1 + B_2}$$

$$\varphi = 1,382 \times 1,899 \sqrt{1,854} = 3,574 \text{ horas}$$

### f) Fator Solar (FS<sub>o</sub>)

$$FS_o = 4 \cdot U \cdot \alpha$$

$$FS_o = 4 \times 0,463 \times 0,3 = 0,580\%$$