2020 ENTAC
XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Futuro da Tecnologia do Ambiente Construído e os Desafios Globais

Porto Alegre, 4 a 6 de novembro de 2020

COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE UM SISTEMA DE VEDAÇÃO VERTICAL DE MADEIRA EM DIFERENTES CIDADES DA ZONA BIOCLIMÁTICA 2[1]

BULIGON, Liliane Bonadiman (1); ZAMBONATO, Bruna (2); LIMA, Selton Fernandes de Sousa (3); FELIPETO, Leonardo (4); GRIGOLETTI, Giane de Campos (5)

(1) Universidade Federal de Santa Maria, libbonadimam@gmail.com
(2) Universidade Federal de Santa Maria, zambonato.bruna@gmail.com
(3) Universidade Federal de Santa Maria, seltonfernandes@gmail.com
(4) Universidade Federal de Santa Maria, leofelipeto92@gmail.com
(5) Universidade Federal de Santa Maria, ggrigoletti@gmail.com

RESUMO

A busca por práticas sustentáveis na construção, especialmente na avaliação e controle de temperatura e umidade da envoltória e do ambiente interno de edificações, vem despertando o estudo de materiais ecológicos e sustentáveis, como a madeira. Este estudo avaliou o comportamento higrotérmico de uma vedação vertical de madeira para quatro cidades do Rio Grande do Sul inseridas na Zona Bioclimática 2 (ZB2) com o programa WUFI® Pro. O sistema é composto por lambril de madeira conífera em ambas as faces e lã mineral como material isolante. A transmitância térmica da vedação foi aprovada para a ZB2 segundo as normas de desempenho NBR 15220 e NBR 15575. O maior risco de condensação encontrado foi na interface entre o isolante térmico e o lambril de madeira interno. De modo geral, o sistema apresentou bom comportamento quanto à análise higrotérmica, mesmo em fachadas expostas a elevado nível de chuva e à baixa incidência de radiação solar, mostrando-se mais favorável a aplicação para o clima de Passo Fundo, e menos favorável para Santa Maria.

Palavras-chave: *WUFI Pro. Madeira. Comportamento higrotérmico. Teor de umidade.*

ABSTRACT

Sustainable practices studies in the field of construction, especially in the assessment and control of temperature and humidity of the envelope and the internal environment of buildings, has been arousing the study of ecological and sustainable materials, such as wood. This study evaluated the hygrothermal behavior of a vertical wooden envelope for four cities located in the bioclimatic zone 2 (ZB2) with the WUFI® Pro program. The system is composed of a coniferous wood panel on both sides and mineral wool as an insulating material. The thermal transmittance of the system was approved for ZB2 according to the performance standards NBR 15220 and NBR 15575. The greatest risk of condensation was found at the interface

[1] BULIGON, Liliane Bonadiman; ZAMBONATO, Bruna; LIMA, Selton Fernandes de Sousa; FELIPETO, Leonardo; GRIGOLETTI, Giane de Campos. Comportamento higrotérmico de um sistema de vedação vertical de madeira em diferentes cidades da Zona Bioclimática 2. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2020.

between the thermal insulator and the internal wood panel. In general, the system performed well in terms of hygrothermal analysis, even on façades exposed to high levels of rain and low incidence of solar radiation, showing a more favorable application for the climate of Passo Fundo, and less for Santa Maria.

***Keywords**: WUFI Pro. Wood. Hygrothermal behavior. Moisture content.*

1 INTRODUÇÃO

A construção e operação de edificações são responsáveis por mais de um terço do consumo de energia e da emissão de dióxido de carbono no mundo (UNEP, 2019). Além disso, a extração de minerais utilizados na construção aumentou 80% entre 1980 e 2008 (OECD, 2007). Os materiais tradicionalmente utilizados na construção civil, como o aço e concreto, são produzidos a partir de recursos não renováveis, gerando elevado impacto ambiental (RUUSKA; HÄKKINEN, 2014). Estratégias como o desenvolvimento de edificações eficientes e a implementação de normas de desempenho são adotadas para tornar o setor construtivo mais sustentável nas dimensões ambiental, sociocultural e econômica (MARVUGLIA et al., 2020).

O uso de materiais renováveis e de baixo impacto é uma alternativa para contribuir na sustentabilidade das edificações. A madeira é um material natural renovável, com potencialidades construtivas e pode ter baixo impacto ambiental com plantio e manejo responsáveis (ARAUJO et al., 2016). Este material é de fácil trabalhabilidade, apresenta alto desempenho térmico e acústico (MOLINA; JUNIOR, 2010). Em média, duas toneladas de CO2 deixam de ser emitidas a cada tonelada de madeira utilizada na construção civil no lugar de outros materiais como aço e concreto (SATHRE; O'CONNOR, 2010).

As propriedades higroscópicas da madeira permitem a absorção da umidade vinda do ambiente, exigindo menores demandas por ventilação para compensar as variações de umidade (HAMEURY, 2005). Além disso, o vapor condensado na estrutura higroscópica da madeira gera trocas de calor latente, que podem levar à redução das variações de temperatura no ambiente e, consequentemente, à redução do consumo energético na edificação (SVORTEVIK; ENGEVIK; KRANIOTIS, 2020).

O Rio Grande do Sul é considerado um dos mais importantes polos de produção e exportação de madeira, móveis e celulose do Brasil. O estado possui aproximadamente 780,9 mil hectares de florestas plantadas, o que corresponde a 2,7% do seu território, panorama que o torna responsável por 10% do total de florestas plantadas no Brasil. Dentre as espécies mais cultivadas estão o eucalipto (54,6%), o pinus (33,9%) e a acácia-negra (11,5%) (AGEFLOR, 2018).

Apesar do quadro positivo no setor florestal, o grande potencial madeireiro do Estado ainda contrasta com a pouca participação do mercado da construção civil (ESPÍNDOLA, 2010). Pesquisas estão sendo realizadas para o desenvolvimento de painéis de vedação em madeira, de modo a garantir a qualidade do ambiente interno e conforto ambiental aos usuários, com baixo consumo energético (GIGLIO; BARBOSA, 2006). Estudos relevantes nesta área do conhecimento foram desenvolvidos na França (LI et al., 2019), Estados Unidos (KORDZIEL et al., 2020), Alemanha (AMERI; RÜTHER, 2019) e Canadá (ZHANG; RICHMAN, 2020).

A avaliação do comportamento higrotérmico de sistemas de vedação permite a análise do comportamento da envoltória exposta a condições climáticas e seus efeitos sobre o ambiente interno e a durabilidade e demanda de manutenção do

sistema construtivo (JORNE, 2010). A avaliação higrotérmica pode auxiliar o projetista a tomar decisões baseadas no comportamento dos materiais em relação ao clima, seja minimizando os riscos de condensação, ou ainda pela previsão do crescimento de mofo. Diante disso, é necessário avaliar o comportamento dos painéis de vedação nas condições climáticas locais para que as edificações em madeira no Brasil sejam duráveis e proporcionem desempenho satisfatório aos usuários.

O presente trabalho avalia o comportamento higrotérmico de uma vedação vertical externa de madeira exposta às condições climáticas de quatro cidades gaúchas inseridas na Zona Bioclimática 2. O estudo tem como objetivo verificar o comportamento da envoltória, comparando os resultados para diferentes cidades da mesma Zona Bioclimática.

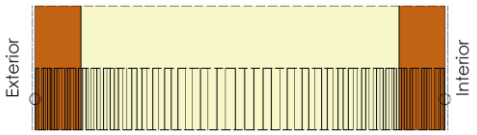
2 MÉTODO

O comportamento higrotérmico do sistema de vedação em madeira foi avaliado para 4 cidades no Estado do Rio Grande do Sul, inseridas na Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB 2)(ABNT, 2005b), por meio de simulação computacional com o programa WUFI Pro versão 6.3, desenvolvido pelo Instituto Franhofer em Física de Edifícios (IPB). A metodologia foi conduzida em três etapas: (I) definição do sistema construtivo, (II) determinação das cidades que pertencem a ZB 2 no Rio Grande do Sul, (III) simulação higrotérmica.

2.1 Definição do sistema construtivo

O sistema é composto por lambril de madeira conífera, com 0,02 m de espessura em ambas as faces, e 0,14 m de lã mineral (Isover Ultimate Klemmfilz) como material de enchimento. A transmitância térmica (U) foi calculada conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). A Tabela 1 apresenta a descrição do sistema construtivo estudado e as propriedades físicas de cada material.

Tabela 1 – Descrição do sistema construtivo e propriedades dos materiais

Representação do sistema construtivo	**Descrição**	**U [W/m²K]**
	Lambril (0,02 m) Lã mineral (0,14 m) Lambril (0,02 m)	0,22

Propriedades dos materiais		
Propriedade	**Madeira Conífera**	**Lã mineral**
Densidade aparente [kg/m³]	400	25,2
Porosidade [m³/m³]	0,73	0,95
Calor específico [J/(kg.K)]	1400	1000
Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	0,09	0,035
Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]	200	1

Fonte: Adaptado de WUFI® Pro 6.3 (WUFI, 2020)

2.2 Cidades que pertencem a Zona Bioclimática 2

Para a análise do comportamento do sistema de vedação, foram selecionados 4 municípios do Rio Grande do Sul. A escolha das cidades seguiu os seguintes parâmetros: (a) pertencer à Zona Bioclimática 2, indicada na NBR 15220 (ABNT, 2005b); (b) possuir arquivos climáticos completos, com dados de temperatura,

radiação, índice de nebulosidade, umidade relativa, velocidade do vento e precipitações; (c) ter população superior a cem mil habitantes. Foram selecionados então os municípios de Passo Fundo (latitude 28,24º Sul, longitude 52,33º Oeste, altitude 724,2 m), Santa Maria (latitude 29,71º Sul, longitude 53,69º Oeste, altitude 87,5 m), Bagé (latitude 31,33º Sul, longitude 54,10º Oeste, altitude 242m) e Uruguaiana (latitude 29,78 º Sul, longitude 57,04 º Oeste, altitude 78 m) (LABEE, 2020).

2.3 Simulação higrotérmica

A simulação foi realizada através do programa WUFI Pro, versão 6.3, considerado um dos programas comerciais mais utilizados para simulação higrotérmica, realizando simulações dinâmicas de transferência acoplada de calor e umidade (CHO et al., 2019; IBRAHIM et al., 2014). Nesse estudo foram avaliadas as propriedades de transmitância térmica, teor de umidade, taxa de secagem e risco de condensação de vapor no sistema de vedação. Para a simulação, foram definidos os seguintes parâmetros no programa: orientação solar ao sul (menor somatório de Radiação Solar incidente); edifício pequeno com altura de até 10 m; paredes externas e internas com pintura do tipo acrílica; refletividade do solo (onda curta) de 0,2; fator de redução da chuva incidente de 0,2.

A chuva incidente foi calculada segundo a Norma ANSI/ASHRAE 160 "Critérios de projeto para controle da umidade em edifícios" (ASHRAE, 2016), considerando fator de exposição à chuva de 1, fator de deposição da chuva de 0,5, para exposição média, sugerido para uso em simulações do programa no Brasil, visto que ainda não há no país publicações de metodologias para a quantificação de montantes de chuva dirigida em fachadas (ZANONI, 2015).

Foi utilizado o arquivo climático do tipo TMY (*Typical Meteorological Year*) da base de dados gerada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET de 2018 (LABEEE, 2020). A Tabela 2 apresenta as condições climáticas das quatro cidades. A condição climática interna foi baseada na ISO 13788, que especifica a maior carga de água entre as opções fornecidas pelo programa e considera a temperatura inicial a 20 °C e umidade relativa na Classe 3. O período da análise de simulação foi de cinco anos com intervalo de tempo de 1 hora, com base na bibliografia para avaliar o comportamento higrotérmico a longo prazo (CHO et al., 2019; PARK et al., 2019; LEE et al., 2020).

Tabela 2 – Dados climáticos das cidades

		Passo Fundo	**Santa Maria**	**Bagé**	**Uruguaiana**
Temperatura (ºC)	Máxima	32,6	38,4	36,2	41,4
	Média	18,3	19,3	15,1	18,1
	Mínima	-5,0	1,0	-10,9	-18,8
Umidade Relativa (%)	Máxima	100,0	100,0	100,0	100,0
	Média	71,9	79,3	84,0	81,3
	Mínima	18,0	9,0	22,0	24,0
Somatório radiação solar (kWh/m²a)		3182,9	3298,1	3120,1	3252,6
Índice de nebulosidade médio (-)		0,6	0,69	0,75	0,71
Velocidade do vento média (m/s)		4,0	3,2	2,8	3,8
Somatório precipitação normal (mm/a)		240,7	46,0	20,8	648,9

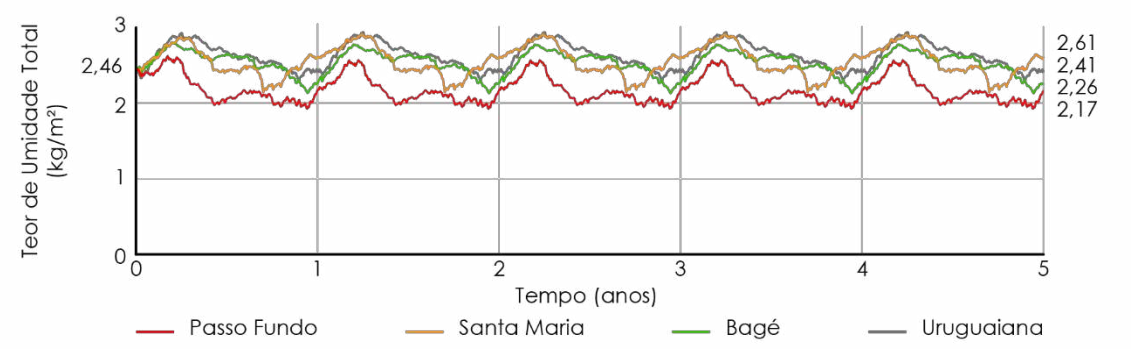
Fonte: Adaptado de LABEEE (2020)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A transmitância térmica resultante do sistema de vedação foi de 0,22 W/m²K, atendendo aos requisitos tanto da NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) quanto da NBR15575-4 (ABNT, 2013) que indicam transmitância térmica máxima de 3,0 W/m²K e 2,5 W/m²K, respectivamente, para a Zona Bioclimática 2.

A Figura 1 e a Tabela 3 apresentam o teor de umidade total inicial e final para as quatro cidades ao longo do período de simulação. O sistema apresentou bom desempenho em relação ao teor de umidade para Passo Fundo, Bagé e Uruguaiana, apresentando teor de umidade total final menor que o inicial, o que indica que o fechamento perdeu umidade ao longo do tempo, apresentando taxas de secagem de 11,79%, 8,13% e 2,03%, respectivamente. Já para Santa Maria, o sistema de vedação não apresentou desempenho satisfatório, visto que acumula umidade no sistema ao longo do tempo, apresentando teor de umidade final maior que o inicial, apresentando taxa de secagem, de -6,1%.

Figura 1 – Teor de umidade total



Fonte: Os autores

Ao analisarmos o teor de umidade por camada (Tabela 3), observa-se que há um aumento considerável (34,53%) no lambril interno para o município de Santa Maria. O mesmo ocorre para Bagé e Uruguaiana, porém em menores proporções, aumentando 12,08% e 26,33% respectivamente, o que faz com que o teor de umidade total final ainda fique abaixo do inicial.

Tabela 3 – Teor de umidade Total

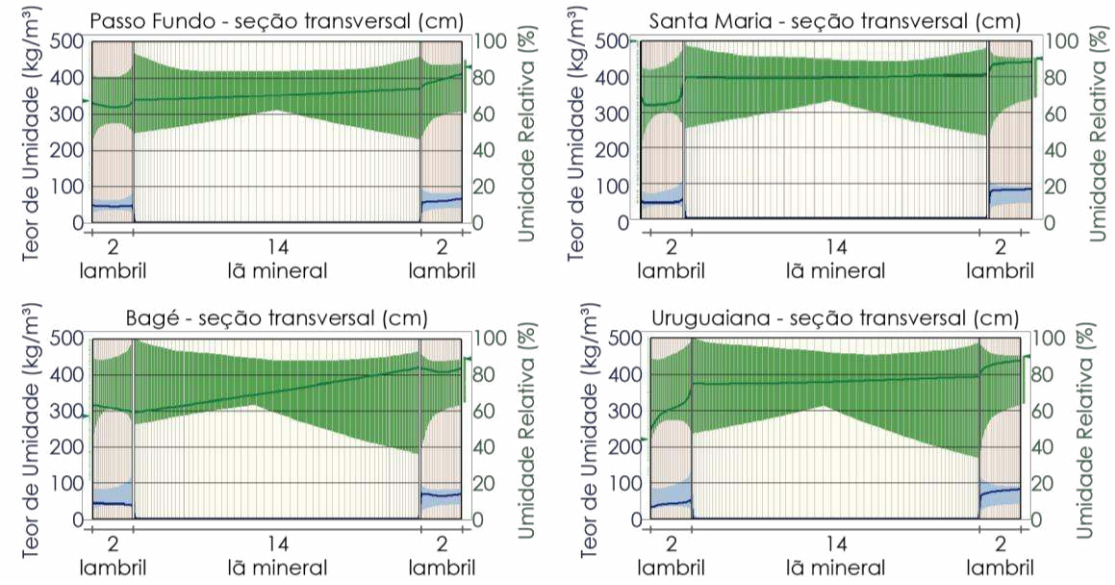
Teor de umidade	**Início**	**Fim**			
		Passo Fundo	**Santa Maria**	**Bagé**	**Uruguaiana**
Teor de umidade total (kg/m²)	2,46	2,17	2,61	2,26	2,41
Teor de umidade lambril externo (kg/m³)	60,00	45,50	46,45	42,74	41,75
Teor de umidade lã mineral (kg/m³)	0,46	0,44	0,46	0,44	0,45
Teor de umidade lambril interno (kg/m³)	60,00	59,82	80,72	67,25	75,75

Fonte: Os autores

A Figura 2 apresenta o comportamento do teor de umidade (azul) e da umidade relativa (verde) ao longo da seção transversal para as quatro cidades analisadas. A linha mais escura representa o estado final destes parâmetros, e as manchas representam as máximas e mínimas atingidas durante o período de simulação.

Observa-se que o comportamento higrotérmico do fechamento é similar para as quatro cidades, apresentando pontos de máxima e mínima umidade relativa nos mesmos locais.

Figura 2 – Teor de umidade e umidade relativa na seção transversal



Fonte: Adaptado de WUFI® Pro 6.3 (WUFI, 2020)

Passo Fundo é a cidade onde o sistema de vedação apresentou menor variação de umidade relativa, com valores máximos não ultrapassando 90% nas superfícies de encontro entre o lambril e a lã mineral interno e externo. Já para Bagé, Uruguaiana e Santa Maria, o encontro entre os materiais na face externa chegou a atingir 100% de umidade relativa, indicando grande risco de condensação de vapor. Por fim, Uruguaiana apresentou a maior variação de níveis de umidade no fechamento. A umidade relativa na superfície entre a lã mineral e o lambril interno variou de 35% a 100% ao longo do período de simulação. Esta grande variação pode prejudicar a durabilidade do material.

Pode se observar que em todas as cidades analisadas o maior risco de condensação ocorreu em ambas as interfaces entre lambril e lã mineral. A ocorrência na interface interna pode ser justificada pela presença do isolante térmico na face mais interna da parede, ocasionando na redução da capacidade de secagem da parede e a um maior teor de umidade nesta interface. Para estudos futuros será preciso avaliar o uso de barreiras de vapor, aconselhável quando há o uso de isolante térmico junto à face interna do sistema de vedação (IBRAHIM et al., 2014).

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento higrotérmico de um sistema de vedação vertical em madeira para quatro cidades gaúchas da Zona Bioclimática 2. Os sistemas foram avaliados com auxílio da ferramenta de simulação WUFI Pro, em relação à transmitância térmica, teor de umidade total, taxa de secagem, teor de umidade por camada e risco de condensação de vapor.

Quanto à transmitância térmica, o sistema composto por lambril de madeira conífera (ambas as faces) e lã mineral como material de enchimento atendeu aos requisitos tanto da NBR 15220-3 (ABNT, 2005a) quanto da NBR15575-4 (ABNT, 2013). Quanto ao

teor de umidade total, o sistema apresentou desempenho satisfatório em Passo Fundo, Bagé e Uruguaiana, havendo redução do teor de umidade ao longo do tempo. Entretanto, para Santa Maria, o sistema de vedação não apresentou desempenho satisfatório, visto que acumula umidade no sistema ao longo do tempo.

O maior risco de condensação encontrado nesse sistema foi na interface entre o isolante térmico e o lambril de madeira interno. Sendo Uruguaiana, o município que apresentou a maior variação de níveis de umidade. A construção com materiais higroscópicos, como é o caso da madeira, pode apresentar crescimento de fungos para valores próximos a 90%. Os resultados mostram a necessidade de avaliar o sistema construtivo escolhido para o clima em que estará submetido. Em cada local, o desempenho do painel pode variar e é preciso verificá-lo para garantir a sustentabilidade, o conforto e a resistência à proliferação de fungos e mofos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

AGEFLOR. Associação Gaúcha de Empresas Florestais. **SUMÁRIO EXECUTIVO – Setor de Base Florestal**. Ano Base 2017. Porto Alegre: AGEFLOR, 2018.

AMERI, S.; RÜTHER, N. Hygrothermal Risk Analysis of Recently Constructed Timber Buildings Exposed to Outdoor Climate Changes by the End of the Century in Germany. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 290, n. 1, 2019.

ARAUJO, V. A. de *et al.* Classification of wooden housing building systems. **BioResources**, v. 11, n. 3, p. 7889–7901, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho Térmico de Edificações**. Rio de Janeiro: 2005 a.

_____. **NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: 2005 b.

_____. **NBR 15575-4: Desempenho de edificações habitacionais**. Rio de Janeiro: 2005 c.

CHO, H. M. *et al.* Hygrothermal properties analysis of cross-laminated timber wall with internal and external insulation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p. 1353–1363, 2019.

ESPÍNDOLA, L. DA R. **Habitação de interesse social em madeira conforme os princípios de coordenação modular e conectividade.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)— Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

GABC – GLOBAL ALLIANCE FOR BUILDINGS CONSTRUCTION; IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; UNEP – UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **2019 global status report for buildings and construction: Towards a zero-emission, efficient and resilient buildings and construction sector**.

GIGLIO, T. G. F.; BARBOSA, M. J. Aplicação de métodos de avaliação do desempenho térmico para analisar painéis de vedação em madeira. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 6, n. 3, p. 91–103, 2006.

HAMEURY, S. Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an

indoor climate: a numerical study. **Building and Environment**, v. 40, p. 1400–1412, 2005.

IBRAHIM, M. *et al.* Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering. **Energy and Buildings**, 2014.

JORNE, F. J. F. **Análise do comportamento higrotérmico de soluções construtivas de paredes em regime variável**. 2010. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

KORDZIEL, S. *et al.* Hygrothermal characterization and modeling of cross-laminated timber in the building envelope. **Building and Environment**, v. 177, 2020.

KRÜGER, E. L.; LAROCA, C. Thermal performance evaluation of a low-cost housing prototype made with plywood panels in Southern Brazil. **Applied Energy**, v. 87, n. 2, p. 661–672, 2010.

LEE, J. *et al.* Prediction evaluating of moisture problems in light-weight wood structure: Perspectives on regional climates and building materials. **Building and Environment**, v. 168, 2020.

LI, M. *et al.* Modelling the hygrothermal behaviour of cement-bonded wood composite panels as permanent formwork. **Industrial Crops and Products**, v. 142, 2019.

MARVUGLIA, A. *et al.* Advances and challenges in assessing urban sustainability: an advanced bibliometric review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 124, 2020.

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

MOTTA, S. R. F.; AGUILAR, Maria Teresa P. Sustentabilidade e processos de projetos de edificações. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, v. 4, n. 1, p. 84–119, 2009.

OECD. Material Resources, Productivity and the Environment: Key Findings. **Green Growth Papers**, p. 1–14, 2007.

PARK, J. H. *et al.* Development of wood-lime boards as building materials improving thermal and moisture performance based on hygrothermal behavior evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 576–585, 2019.

RUUSKA, A.; HÄKKINEN, T. Material efficiency of building construction. **Buildings**, v. 4, n. 3, p. 266–294, 2014.

SATHRE, R.; O'CONNOR, J. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. **Environmental Science and Policy**, v. 13, n. 2, p. 104–114, 2010.

SETTER, L. *et al.* Energy and hygrothermal performance of cross laminated timber single-family homes subjected to constant and variable electric rates. **Journal of Building Engineering**, v. 25, 2019.

SVORTEVIK, V. J.; ENGEVIK, M. B.; KRANIOTIS, D. Use of cross laminated timber (CLT) in industrial buildings in Nordic climate – A case study. **IOP Conf. Series: Earth and Environmental Scienc**, v. 410, 2020.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. 2015.

ZHANG, K.; RICHMAN, R. Parametric analysis of moisture sorption isotherms for wood sheathing using hygrothermal modelling. **Journal of Building Engineering**, v. 28, 2020.