

Área: Sustentabilidade | Tema: Temas Emergentes em Sustentabilidade

Estudo do desempenho higrotérmico de uma vedação vertical de madeira para diferentes mesorregiões do Rio Grande do Sul

Hygrothermal performance study of a vertical wood closure for different mesoregions of Rio Grande do Sul

Gabriela Meller, Elaise Gabriel, Mainara Ridiani Palcikoski, André Bertoldo Dalla Favera e Giane De Campos Grigoletti

RESUMO

A sustentabilidade vem sendo constantemente pesquisada na construção civil, especialmente na avaliação de materiais e técnicas construtivas utilizadas para maior controle de temperatura e umidade na envoltória e no ambiente interno de edificações. Este estudo avaliou o desempenho higrotérmico de uma vedação vertical de madeira para diferentes mesorregiões do Rio Grande do Sul, afim de identificar para qual clima o sistema irá apresentar melhor desempenho e, também, fomentando o desenvolvimento de sistemas construtivos de menor impacto ambiental. O fechamento foi composto por lambril de madeira (do tipo madeira dura) em ambas as faces e uma camada de ar na interface dos materiais. A metodologia utilizada foi simulação computacional com o uso do programa WUFI® Pro (versão 6.3). Os arquivos climáticos utilizados correspondem ao ano de 2016. Como resultado, a parede foi aprovada quanto ao desempenho térmico em todas as mesorregiões para as normas de desempenho NBR 15220-3 e NBR 15575-4 (ABNT, 2005; ABNT, 2013). O sistema também foi aprovado em todas as mesorregiões para o fluxo do transporte capilar. O fechamento direcionou o vapor para fora da edificação em todos os locais analisados. O Sudeste foi o local mais propenso ao transporte de vapor para o sistema proposto, apresentando o valor de $-0,13 \text{ kg/m}^2$, ainda assim, o transporte de vapor ocorreu em direção ao exterior da edificação. Verificou-se que a camada de ar relatou o menor teor de umidade no Centro Ocidental. Apesar de o sistema apresentar ótimo desempenho térmico ($U = 1,638 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), o mesmo não foi aprovado no Sudeste e Centro Oriental em diversas análises. Contudo, mostrou-se ser um sistema construtivo altamente indicado para as mesorregiões Centro Ocidental, Nordeste, Noroeste e Sudoeste, comprovando seu desempenho higrotérmico e proporcionado ao usuário uma alternativa mais sustentável que se comparado aos sistemas convencionais.

Palavras-Chave: Sistema de vedação de madeira; Desempenho higrotérmico; Risco de condensação; Teor de umidade.

ABSTRACT

Sustainability has been constantly researched in civil construction, especially in the evaluation of materials and construction techniques used for greater temperature and humidity control in the envelope and in the internal environment of buildings. This study evaluated the hygrothermal performance of a vertical wood sealing for different mesoregions of Rio Grande do Sul, in order to identify which climate the system will perform better and also promoting the development of building systems with lower environmental impact. The closure consisted of timber (hardwood type) on both sides and an air layer at the material interface. The methodology used was computer simulation using the WUFI® Pro software (version 6.3). The climate files used correspond to the year 2016. As a result, the wall was approved for thermal performance in all mesoregions for performance standards NBR 15220-3 and NBR 15575-4 (ABNT, 2005; ABNT, 2013). The system has also been approved in all mesoregions for capillary transport flow. The closure directed vapor out of the building at all locations analyzed. The Southeast was the place most prone to vapor transport for the proposed system, with a value of -0.13 kg / m^2 , yet the vapor transport occurred towards the outside of the building. It was found that the air layer reported the lowest moisture content in the Western Center. Although the system has excellent thermal performance ($U = 1,638 \text{ W / m}^2\cdot\text{K}$), it has not been approved in the Southeast and East Center in several analyzes. However, it has proved to be a highly recommended building system for the Midwest, Northeast, Northwest and Southwest mesoregions, proving its hygrothermal performance and providing the user with a more sustainable alternative compared to

conventional systems.

Keywords: Wood closure system; Hygrothermal performance; Risk of condensation; Moisture content.

ESTUDO DO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE UMA VEDAÇÃO VERTICAL DE MADEIRA PARA DIFERENTES MESORREGIÕES DO RIO GRANDE DO SUL

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a sustentabilidade em edificações é um tópico constantemente pesquisado na construção civil, cuja avaliação inclui a análise dos materiais empregados e as técnicas construtivas utilizadas para maior controle de temperatura e umidade tanto na envoltória quanto no ambiente interno. Esta avaliação proporciona salubridade e qualidade do ambiente interno com maior durabilidade e baixa manutenção. Também, a avaliação do comportamento higrotérmico de edificações permite identificar como é o comportamento da envoltória diante às condições climáticas e quais são seus efeitos no ambiente interno e, conjuntamente, na durabilidade e necessidade de manutenção do sistema construtivo analisado (JORNE, 2010).

A patologia da umidade em uma edificação, além de afetar a saúde dos usuários, causa degradação acentuada dos elementos construtivos, bem como o desconforto dos usuários. O desenvolvimento de fungos é um dos indicadores da umidade relativa elevada no interior das edificações (RAMOS, 2007). A água também pode causar outros efeitos, como a deterioração por congelamento, perda de aderência entre camadas causada pela condensação do vapor de água na interface entre camadas e, também, efeitos como ataques químicos a pedras naturais, corrosão de elementos de concreto, entre outros (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007). Assim, é de suma importância a análise do comportamento higrotérmico dos materiais e dos sistemas construtivos de modo a prever sua durabilidade e a qualidade do ambiente interno das edificações, frente às intempéries que estão expostos.

Outras características indicadas para construções sustentáveis são o uso de materiais ecológicos, a redução do consumo energético e do impacto ambiental (LEITE et al., 2017). A madeira possui características favoráveis às práticas de sustentabilidade em edificações. Seu processo produtivo apresenta baixos níveis de consumo energético e auxilia na redução da emissão de gases do efeito estufa (DEMARZO; PORTO, 2007). A madeira é considerada um material de origem natural, renovável e reciclável, com impacto ambiental e social positivo quando trabalhada com manejo responsável (ARAUJO et al., 2016). Considerando que o Brasil é um dos principais produtores mundiais de árvores plantadas e esta produção é destinada principalmente à produção de celulose, papel, painéis de madeira e pisos laminados (IBÁ, 2017), é importante que sejam desenvolvidos estudos que mostrem a viabilidade do uso deste material na construção civil.

Além disso, são necessários estudos que comprovem a viabilidade da madeira como material construtivo no âmbito do clima no qual será inserida. Levando em conta o clima brasileiro, a Associação Brasileira de Normas Técnicas lançou em 2003 a NBR 15220-3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social, que classifica o Brasil em oito diferentes zonas bioclimáticas de acordo com as temperaturas e variações de umidade.

Este trabalho analisa o desempenho higrotérmico de uma vedação vertical externa para diferentes mesorregiões do Rio Grande do Sul situadas na Zona Bioclimática 2 (ZB2). Todas as mesorregiões foram avaliadas, com exceção da metropolitana, em virtude deste local se situar na Zona Bioclimática 3. Assim, tem-se o objetivo de verificar se uma vedação vertical de madeira serrada tem comportamento higrotérmico semelhante dentro da mesma Zona Bioclimática (ZB), além de contribuir para o desenvolvimento de sistemas construtivos de menor impacto ambiental.

2 MÉTODO

O método baseou-se em simulações computacional com o intuito de identificar os fluxos de umidade e o desempenho térmico em seis mesorregiões do estado do Rio Grande do Sul. Com a utilização do programa WUFI® Pro (versão 6.3) para a realização das simulações, a metodologia seguiu quatro etapas: (I) definição do sistema construtivo de fachada de madeira, (II) determinação das cidades que representaram cada mesorregião (III) caracterização dos parâmetros do programa, (IV) simulação e análise dos resultados.

2.1 DETERMINAÇÃO DO SISTEMA CONSTRUTIVO

A vedação vertical foi composta por um sistema constituído de lambril de madeira serrada (madeira dura) com 0,02 m de espessura em ambas as faces e uma camada interna de ar com 0,10 m. A resistência térmica (R) e a transmitância térmica (U) foram calculadas de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). O Quadro 1 apresenta a descrição do fechamento estudado.

As características de cada material utilizado estão apresentadas no Quadro 2.

Quadro 1 – Descrição do sistema construtivo adotado

Representação do sistema construtivo	Composição	R [m ² K/W]	U [W/m ² K]
	0,02 m de lambril (madeira dura) + 0,10 m de ar + 0,02 m de lambril (madeira dura)	0,43	1,638

Fonte: adaptado de WUFI® Pro 6.3 (WUFI, 2019).

Quadro 2 - Propriedades dos materiais construtivos utilizados.

Propriedade	Madeira dura	Camada de ar
Densidade aparente [kg/m ³]	650	1,30
Porosidade [m ³ /m ³]	0,47	0,999
Calor específico [J/(kg.K)]	1400	1000
Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	0,13	0,59
Fator de resistência à difusão de vapor de água [-]	200	0,15
Condutividade térmica complementar dependente da temperatura [W/(m.K ²)]	0,0002	-
Condutividade térmica complementar dependente da umidade [%/M.-%]	1,3	-

Fonte: adaptado de WUFI® Pro 6.3 (WUFI, 2019).

2.2 CIDADES UTILIZADAS EM CADA MESORREGIÃO DA ZB2

Com o intuito de analisar o comportamento do fechamento em cada mesorregião pertencente à ZB2 do Rio Grande do Sul, buscaram-se municípios que pertencessem a cada uma delas. Para isso, foram definidas cidades que tivessem o seu arquivo climático completo,

com dados da temperatura, radiação, índice de nebulosidade, precipitações, umidade relativa e velocidade do vento. As cidades utilizadas e sua respectiva localização estão descritas no Quadro 3.

Foram utilizados no programa os arquivos climáticos fornecidos pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE, 2019), no formato *EnergyPlus Weather Data Format (EPW)*, correspondente ao ano de 2016.

Quadro 3 – Cidades analisadas para cada mesorregião

	Cidade	Latitude	Longitude	Altitude
Centro Ocidental	Santa Maria	29,68° Sul	53,81° Oeste	95 m
Centro Oriental	Rio Pardo	29,87° Sul	52,38° Oeste	111 m
Nordeste	Vacaria	28,51° Sul	50,88° Oeste	986 m
Noroeste	Cruz Alta	29,78° Sul	55,79° Oeste	121 m
Sudeste	Chuí	30,03° Sul	51,23° Oeste	47 m
Sudoeste	Alegrete	29,78° Sul	55,79° Oeste	121 m

Fonte: adaptado de LABEEE (2019).

2.3 CALIBRAÇÃO DOS MODELOS

Para a calibração dos modelos estudados, foram determinados os seguintes parâmetros no programa: orientação solar ao sul, em virtude de ser a orientação que recebe menor incidência solar, sendo, portanto, a mais crítica; edifício pequeno com altura de até 10 m; refletividade do solo (onda curta) de 0,2; fator de redução da chuva incidente de 0,7, a qual depende da inclinação do elemento construtivo; parede interna sem revestimento.

As superfícies externas receberam pintura acrílica incolor, sendo visível a cor marrom, portanto, a absorvância da parede foi considerada no valor de $\alpha = 0,74$ de acordo com a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

A edificação foi determinada como plana, composta de dois dormitórios, com taxa de uma renovação do ar por hora e volume do edifício de 500m³. O parâmetro de análise foi a ANSI/ASHRAE 160 (ASHRAE, 2016), método 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).

O período da simulação foi de dois anos com intervalo de tempo de 1 hora. A malha de análise dos pontos foi adotada como fina com 100 pontos.

Com base no arquivo climático utilizado para cada local de estudo, o dado do clima interno (temperatura média, temperatura máxima e temperatura mínima), do somatório da radiação, do índice de nebulosidade médio, da umidade relativa média, da umidade relativa máxima, umidade relativa mínima, velocidade do vento média e somatório da precipitação normal para cada mesorregião estão apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 – Dados climáticos utilizados para cada mesorregião

	Centro Ocidental	Centro Oriental	Nordeste	Noroeste	Sudeste	Sudoeste
Temperatura média [°C]	19,0	18,8	15,6	19,2	20,0	19,2
Temperatura máxima [°C]	38,3	37,3	31,1	37,7	37,4	37,7
Temperatura mínima [°C]	1,1	1,4	0,1	1,1	2,8	1,1
Somatório da radiação [kWh/m²a]	3177,9	3168,4	3011,4	3178,6	3226,7	3178,6
Índice de nebulosidade médio [-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5

Umidade relativa média [%]	75,7	77,9	82,2	73,2	74,0	73,2
Umidade relativa máxima [%]	97	98	99	99	96	99
Umidade relativa mínima [%]	18	26	21	21	23	21
Velocidade do vento média [m/s]	2,1	2,9	3,6	2,5	1,5	2,5
Somatório da precipitação normal [mm/a]	890	1545	2026	1470	1168	1470

Fonte: adaptado de LABEEE (2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste estudo foram verificados os parâmetros quanto ao desempenho térmico da ZB2 na qual o fechamento está inserido, assim como a integração dos fluxos por transporte capilar (kl) e por transporte de vapor (dl) do sistema, seu balanço de umidade, teor de umidade e, por fim, a integração dos fluxos de calor e umidade relativa ao tempo de dois anos.

Em todos os resultados simulados não foram apresentadas falhas de convergência, o que indicou sua confiabilidade. O programa WUFI® Pro 6.3 parte de um método iterativo para a solução das equações de transportes higrótérmicos. Assim, caso haja uma convergência com tempo de processamento muito lento, o número máximo de iterações possíveis será excedido pelo fato de não apresentarem soluções que atendam aos critérios de encerramento do sistema, fazendo com que haja um número de falhas não aceitáveis.

3.1 ANÁLISE QUANTO AO DESEMPENHO TÉRMICO

A verificação quanto ao desempenho térmico da vedação vertical foi efetuada segundo os critérios das normas de desempenho térmico de edificações NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) e NBR 15575-4 (ABNT, 2013). Como critério mínimo, a NBR 15220-3 estipula que para paredes leves a transmitância térmica seja menor ou igual a 3,0 W/m²K (ABNT, 2005b). Já a NBR 15575-4 estipula que o desempenho mínimo necessário deve ser 2,5 W/m²K para a ZB2 (ABNT, 2013).

Diante do resultado obtido com a simulação de transmitância térmica igual a 1,638 W/m².K, a parede foi aprovada quanto ao desempenho térmico em ambas normas de desempenho.

3.2 TESTE DE INTEGRAÇÃO DE FLUXOS

Para atingir a condensação do vapor e haver o transporte capilar é necessário que a temperatura do sistema atinja a temperatura de orvalho, temperatura para qual, numa determinada massa de ar, não se verifica variação da pressão de vapor de água, atingindo-se a saturação. Desta forma, torna-se essencial analisar o transporte capilar no sistema, assim como a direção do seu fluxo, no qual o sinal negativo indica que o transporte está saindo da edificação, sendo favorável para o sistema analisado. A análise do fluxo do transporte de vapor também é necessária para verificar se esses fluxos de umidade direcionarão o fluxo de vapor para fora ou para dentro do ambiente (JORNE, 2010). Ressalta-se que os fluxos de umidade podem ocorrer entre a superfície e o componente, pelo fato de que parte da quantidade de água que chega à superfície poder escoar entre os componentes caso ocorra a condensação em uma superfície fria.

O Quadro 5 apresenta os resultados da integração de fluxos por transporte capilar (kl) e transporte de vapor (dl) do sistema construtivo analisado (composto por 0,02 m de lambril de madeira dura em ambas as faces e 0,10 m de camada de ar no interior do fechamento), obtidos

por meio de simulações para cada sistema de integração e do seu respectivo balanço de umidade.

Quadro 5 – Integração de fluxos por transporte capilar e transporte de vapor

Mesorregião	Transporte capilar do lado esquerdo (kl) [kg/m ²]	Transporte capilar do lado direito (kr) [kg/m ²]	Transporte de vapor do lado esquerdo (dl) [kg/m ²]	Transporte de vapor do lado direito (dr) [kg/m ²]
Centro Ocidental	0,0	0,0	-1,60	-0,44
Centro Oriental	0,0	0,0	-0,92	-0,35
Nordeste	0,0	0,0	-2,16	-1,19
Noroeste	0,0	0,0	-2,24	-1,12
Sudeste	0,0	0,0	-0,57	-0,13
Sudoeste	0,0	0,0	-1,84	-0,72

Fonte: autores (2019).

Observa-se que o sistema construtivo, quando analisado quanto ao transporte capilar, foi aprovado em todas as mesorregiões, constatando-se que não houve transporte capilar durante o seu tempo de análise de 2 anos.

Ao analisar a quantidade de vapor transportado, observa-se que o fechamento vertical apresentou fluxo negativo em todas as mesorregiões, indicando que seu transporte irá ocorrer em direção ao lado externo da edificação. Em ordem decrescente o sistema apresentou melhores resultados na mesorregião Nordeste, Noroeste, Sudoeste, Centro Ocidental, Centro Oriental e, por fim, Sudeste. O Sudeste foi o local em que o fechamento apresentou maior propensão ao transporte de vapor, apresentando o valor de -0,13 kg/m², ainda assim, o transporte de vapor ocorreu em direção ao exterior da edificação.

No que tange ao balanço entre a integração de fluxos de ambos os lados da edificação, é essencial que estes valores sejam iguais, pois se trata da verificação da mudança no conteúdo total de água durante o cálculo e a soma dos fluxos de superfície, ou seja, kl + dl - kr - dr. O Quadro 6 mostra que o Balanço 1 foi igual ao Balanço 2 para todas as mesorregiões.

Quadro 6 – Integração de fluxos por transporte capilar e transporte de vapor

Mesorregião	Balanço 1 [kg/m ²]	Balanço 2 [kg/m ²]
Centro Ocidental	-1,16	-1,16
Centro Oriental	-0,58	-0,58
Nordeste	-0,97	-0,97
Noroeste	-1,13	-1,13
Sudeste	-0,44	-0,44
Sudoeste	-1,12	-1,12

Fonte: autores (2019).

3.3 TEOR DE UMIDADE TOTAL (TUT)

O teor de umidade total (kg/m²) é resultado do somatório do teor de umidade médio por volume de cada camada do sistema construtivo (kg/m³), dividido pela sua espessura (m). Este valor indica a habilidade do sistema de fechamento de secar ao longo do tempo (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007). Assim, foram comparados o teor de umidade total do início da simulação e o teor de umidade total ao final do período de dois anos de simulação. Quando

o valor ao final da simulação é menor que o valor inicial, significa que o sistema tende a perder umidade ao longo do tempo.

O Quadro 7 apresenta o teor de umidade total inicial e final contido no sistema construtivo analisado para cada mesorregião ao longo do período de dois anos. O fechamento foi aprovado em todas os locais, pois apresentaram teor de umidade total final menor que o teor de umidade total inicial. Observa-se que o fechamento apresentou maior teor de umidade total nas mesorregiões Sudeste e Centro Oriental. Já o fechamento apresentou menor teor de umidade no Centro Ocidental.

Quadro 7 – Teor de umidade total

Mesorregião	Centro Ocidental	Centro Oriental	Nordeste	Noroeste	Sudeste	Sudoeste
TUT inicial [kg/m ²]	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11	4,11
TUT final [kg/m ²]	2,93	3,53	3,13	2,97	3,67	2,97

Fonte: autores (2019).

3.3.1 Teor de umidade por camadas

Ao analisar o teor de umidade por camadas compostas por lambril (0,20 m) em ambas as faces e camada de ar (0,10 m), foi possível identificar a eficiência do sistema construtivo quanto a proteção à umidade e, conseqüentemente, quanto à proliferação de fungos e retenção de umidade (Quadro 8). Verificou-se que ao analisar o fechamento interno composto de madeira dura, o menor teor de umidade foi constatado na mesorregião Nordeste, ao final da simulação, havendo uma diferença de 26,82 kg/m³ se comparado ao início. O pior resultado deste fechamento se apresentou no Sudeste, com diferença do teor de umidade de apenas 3,77 kg/m³, se comparado ao início da simulação.

Ratificou-se que a camada de ar relatou o menor teor de umidade nas mesorregiões Centro Ocidental.

Quadro 8 – Teor de umidade por camada

Mesorregião	Camada	Início [kg/m ³]	Fim[kg/m ³]	Mínimo [kg/m ³]	Máximo [kg/m ³]
Centro Ocidental	Madeira dura	98,00	70,85	54,82	99,41
	Camada de ar	1,88	0,80	0,65	1,88
	Madeira dura	98,00	71,66	68,69	98,00
Centro Oriental	Madeira dura	98,00	78,43	57,12	98,34
	Camada de ar	1,88	1,30	0,73	1,88
	Madeira dura	98,00	91,60	71,31	115,72
Nordeste	Madeira dura	98,00	81,64	63,79	101,73
	Camada de ar	1,88	0,89	0,78	1,88
	Madeira dura	98,00	70,26	67,90	98,00
Noroeste	Madeira dura	98,00	71,18	47,94	99,30
	Camada de ar	1,88	0,85	0,58	1,88
	Madeira dura	98,00	73,00	66,66	98,00
Sudeste	Madeira dura	98,00	81,84	67,22	98,15
	Camada de ar	1,88	1,44	0,97	1,88
	Madeira dura	98,00	94,23	80,98	107,33
Sudoeste	Madeira dura	98,00	70,59	46,08	99,26
	Camada de ar	1,88	0,84	0,54	1,88
	Madeira dura	98,00	73,75	65,33	98,00

Fonte: autores (2019).

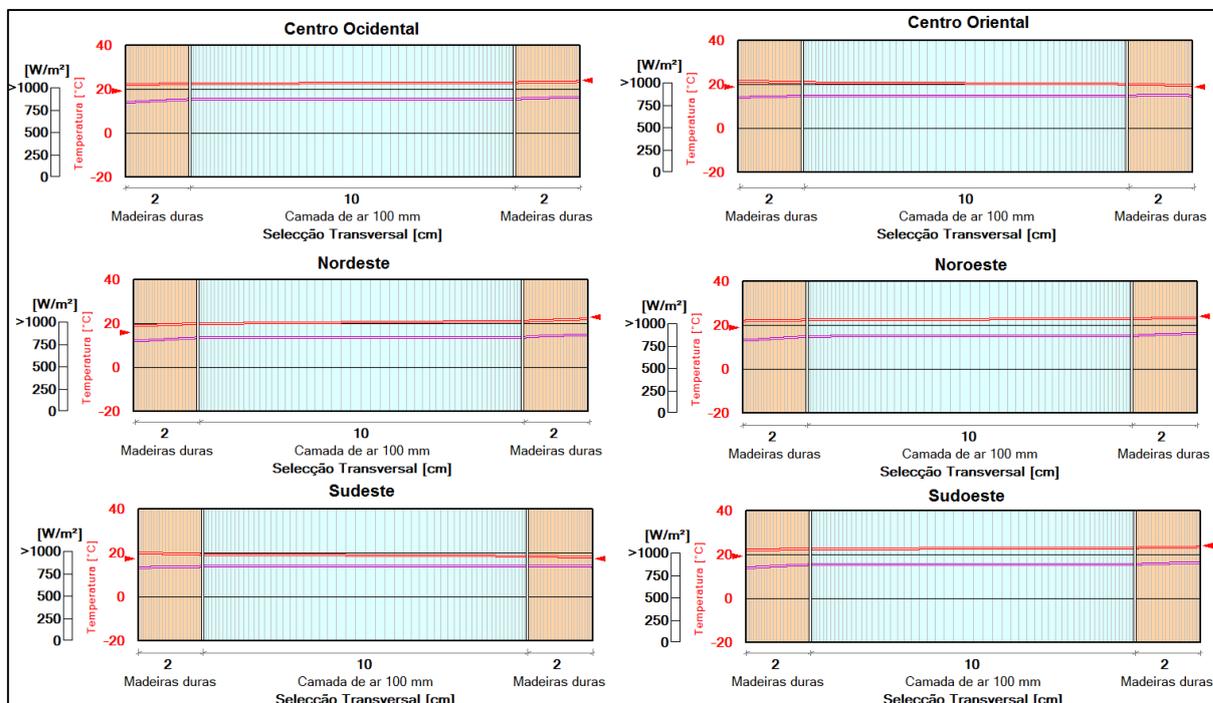
3.4 RISCO DE CONDENSAÇÃO

O risco de condensação é um fator importante a ser analisado, pois indica se há possibilidade de ocorrência de água no estado líquido em algum local do sistema, cujo fator pode ocasionar a degradação e o crescimento de fungos, por exemplo. Os pontos de risco de condensação podem ser identificados, ao se realizar uma comparação entre a temperatura da superfície (TS) e a temperatura do ponto de orvalho (TO). O risco de condensação é verificado quando a temperatura do ponto de orvalho for superior à temperatura em uma determinada posição do sistema construtivo, atingindo uma umidade relativa de 100% (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007).

Contudo, valores de umidade relativa abaixo de 100% não significam que não haja condensação para todos os tipos de materiais. Materiais higroscópicos apresentam condensação para valores menores que 100%. A madeira, por exemplo, pode apresentar crescimento de fungos para valores próximos a 90%. Considerando-se a incerteza quanto ao valor de umidade relativa para o qual pode existir a presença de água líquida, algumas normativas (em que se baseia a formulação do WUFI®) consideram que há risco de condensação e crescimento de fungos para valores de umidade relativa a partir de 80% para materiais higroscópicos (JORNE, 2010).

Com base nas simulações, a Figura 1 apresenta a temperatura (linha vermelha) e o ponto de orvalho (linha violeta) exibindo que em todas as mesorregiões, o ponto de orvalho do fechamento esteve abaixo da temperatura média para os dois anos simulados, demonstrando que não há risco de condensação.

Figura 1 - Temperatura [°C] e ponto de orvalho



Fonte: adaptado de WUFI (2019).

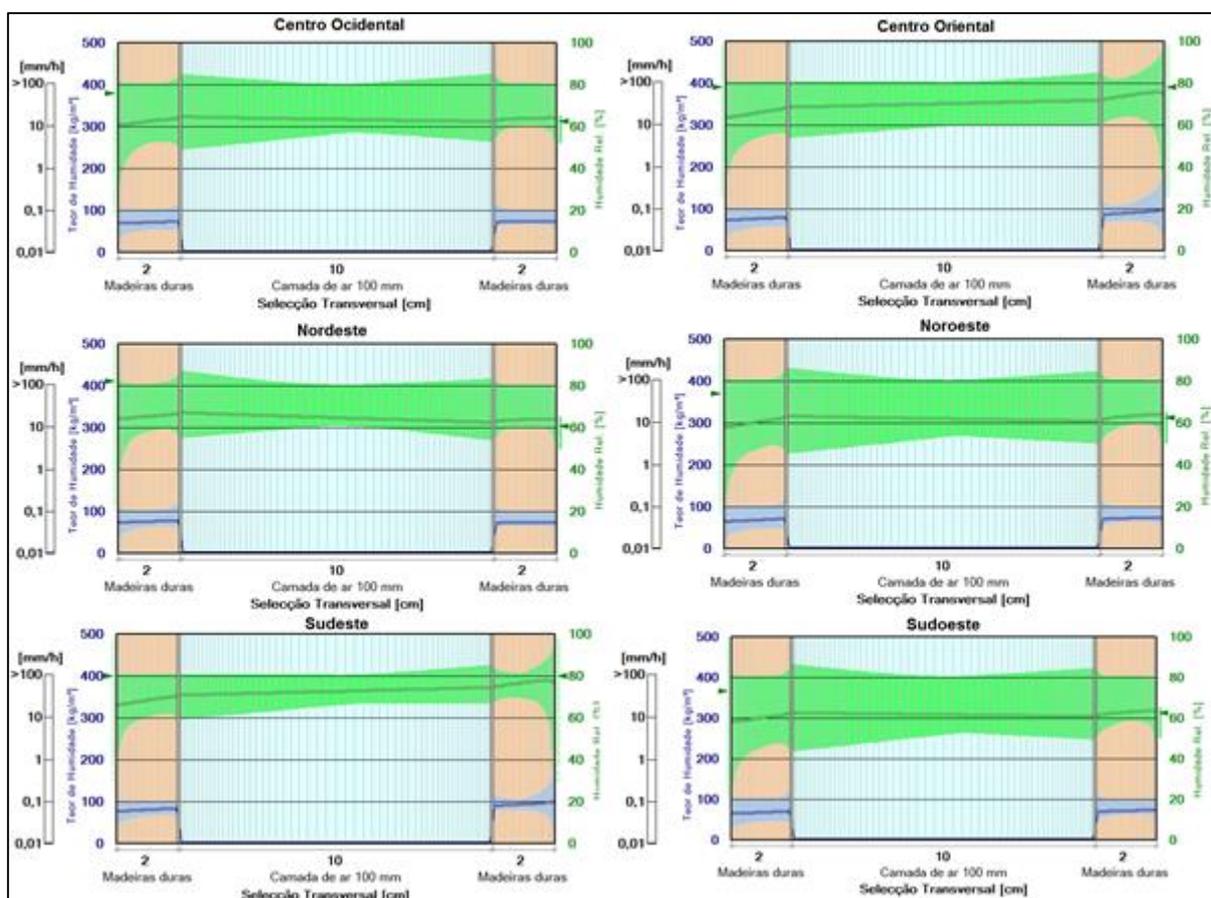
A Figura 2 apresenta os valores relativos à umidade relativa e ao teor de umidade do sistema de vedação analisado para cada mesorregião. As linhas azul e verde representam, respectivamente, o teor de umidade e a umidade relativa presentes no sistema construtivo ao

final do período de simulação. Já as manchas azul e verde representam, respectivamente, os valores máximos e mínimos de o teor de umidade e a umidade relativa atingidos em cada posição do sistema construtivo ao longo do período de simulação.

Em todas as mesorregiões, a umidade relativa do ar média do sistema de vedação esteve abaixo de 80%, porém determinados momentos ao longo da simulação apresentaram umidade relativa acima de 80%. Ressalta-se que em certos instantes a umidade relativa do ar esteve em 80%, na parte interna da edificação para as mesorregiões Centro Ocidental, Nordeste, Noroeste e Sudoeste.

Nas mesorregiões Centro Oriental e Sudeste, o fechamento apresentou umidade relativa próxima de 90% em certos momentos, principalmente no lambril inteiro do sistema, havendo grande risco de ocorrência de condensação nestes pontos.

Figura 2 - Teor de umidade [kg/m^3] e umidade relativa [%]



Fonte: adaptado de WUFI (2019).

Ao se comparar o comportamento do sistema de vedação em cada mesorregião quanto à probabilidade de condensação de água, os melhores resultados foram obtidos no Sudoeste e Nordeste. Entretanto, o sistema apresentou umidade relativa acima de 80% em algum de seus pontos e em algum momento ao longo da simulação. Torna-se necessário, então, em trabalhos futuros, analisar a porcentagem de tempo em que houve ocorrência de umidade relativa acima de 80% em cada mesorregião, para que se possa identificar aquele com maior ou menor risco de ocorrência de condensação e estabelecer o comportamento do sistema aplicados em diferentes zonas bioclimáticas.

3.5 INTEGRAÇÃO DOS FLUXOS RELATIVOS AO TEMPO DE 2 ANOS

No que tange ao fluxo de calor, o programa baseia-se em modelo em que a radiação solar incidente cria um vetor de fluxo de calor na direção x positiva e, conforme esta energia é absorvida no material e é convertida em calor, grande parte também flui como um fluxo de calor para fora do componente, na direção x negativa.

Dessa forma, o sistema construtivo analisado dispôs o fluxo de calor para fora da edificação em praticamente todas as mesorregiões (Quadro 10), com exceção do Sudeste e Centro Oriental. O melhor desempenho quanto ao fluxo de calor se deu no Nordeste (-440,77 MJ/m²) e, o pior, no Sudeste, com 298,27 MJ/m² de fluxo de calor no interior da edificação.

Diante da análise quanto ao fluxo de umidade, verificou-se que a umidade contida no fechamento foi direcionada para o exterior do ambiente para todas as mesorregiões. O sistema apresentou melhores resultados nas regiões Nordeste e Noroeste. Já o menor fluxo de umidade se deu no Sudeste, ainda assim, seu fluxo foi direcionado para o lado de fora da edificação. Assim, ao analisar o fluxo de umidade, o sistema proposto é recomendado para todas as mesorregiões situadas na ZB2 do Rio Grande do Sul.

Quadro 10 – Integração de fluxos de calor e umidade relativamente ao tempo

Mesorregião	Fluxo de calor do lado esquerdo [MJ/m ²]	Fluxo de calor do lado direito [MJ/m ²]	Fluxo de umidade do lado esquerdo [kg/m ²]	Fluxo de umidade do lado direito [kg/m ²]
Centro Ocidental	-3183,27	-194,70	-1,61	-0,43
Centro Oriental	-2786,07	295,38	-0,93	-0,35
Nordeste	-3508,06	-440,77	-2,16	-1,18
Noroeste	-3483,92	-211,8	-2,25	-1,11
Sudeste	-2802,93	298,27	-0,57	-0,13
Sudoeste	-3366,97	-154,32	-1,85	-0,71

Fonte: autores (2019).

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos foi possível verificar a importância de estudar detalhadamente os materiais a serem empregados nas edificações, os quais devem considerar o melhor desempenho quanto às intempéries, a fim de proporcionar conforto ao usuário, além de ser resistente quanto à proliferação de fungos e mofos, sendo as tipologias sempre escolhidas sob o viés da sustentabilidade.

Quanto ao desempenho térmico do sistema de vedação nas mesorregiões analisadas, o sistema proposto de acordo com as NBR 15220-3 (ABNT, 2005b) e NBR 15575-4 (ABNT, 2013) foi aprovado em todas as zonas.

Quanto ao fluxo do transporte de capilar, o sistema construtivo foi aprovado em todas as mesorregiões, cujos resultados se indicaram positivos. Quanto à transferência de vapor, o fechamento vertical foi aprovado em todos os locais analisados. O Sudeste foi o local mais propenso ao transporte de vapor para o sistema proposto, apresentando o valor de -0,13 kg/m², ainda assim, o transporte de vapor ocorreu em direção ao exterior da edificação.

Em todas as mesorregiões, a umidade relativa do ar média do sistema de vedação esteve abaixo de 80%, porém determinados momentos ao longo da simulação apresentaram umidade relativa acima de 80%. Ressalta-se que em certos instantes a umidade relativa do ar esteve em

80% na parte interna da edificação para as mesorregiões Centro Ocidental, Nordeste, Noroeste e Sudoeste.

Ao averiguar o teor de umidade em cada camada do sistema de vedação, verificou-se que a camada de ar relatou o menor teor de umidade no Centro Ocidental. Ratificou-se que na mesorregião Nordeste ocorreu o menor teor de umidade na camada do fechamento em contato com o interior da edificação (lambriel de madeira dura), havendo uma diferença de 26,82 kg/m³ se comparado ao início da simulação.

Também, o sistema construtivo proposto dispôs o fluxo de calor e umidade para fora da edificação em praticamente todas as mesorregiões, com exceção do Sudeste e Centro Oriental.

Destaca-se que por mais que o sistema tenha apresentado ótimo desempenho térmico (com $U = 1,638 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$), o mesmo não foi aprovado no Sudeste e Centro Oriental em diversas análises. Contudo, mostrou-se ser um sistema construtivo altamente indicado para as mesorregiões Centro Ocidental, Nordeste, Noroeste e Sudoeste, comprovando seu desempenho higrotérmico e proporcionado ao usuário uma alternativa mais sustentável que se comparado aos sistemas convencionais.

Como continuidade deste trabalho, novas simulações serão realizadas, incluindo o uso de outros tipos de materiais, bem como a comparação do desempenho dos sistemas construtivos para diferentes orientações e ZBs, além de analisar a porcentagem de tempo em que houve ocorrência de umidade relativa acima de 80% em cada mesorregião.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: 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 componentes de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2005a.

_____. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005b.

_____. **NBR 15575-4**: Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4 - Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ARAUJO, V. A. et al. Classification of Wooden Housing Building Systems. **BioResources**. Raleigh, Carolina do Norte, EUA, v. 11, n. 3, p. 7889-7901. 2016a.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 160**: Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. Atlanta: ASHRAE, 2016.

DEMARZO, M. A.; PORTO, A. L. G.; Indicadores de Sustentabilidade (LCA) e Análise de Ciclo de Vida para madeira de reflorestamento na construção civil. **Revista Madeira Arquitetura & Engenharia**, n. 21, 17 p., 2007.

GIARMA, C.; BIKAS, D.; ARAVANTINOS, D. Hygrothermal profiles of building elements in the context of service life design. In: Portugal SB 2007 – Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of Industry for the New Millennium, 2007, Minho. **Anais...** Minho: Portugal SB 2007, 2007.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2017**. São Paulo: IBÁ, 2017.

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

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos climáticos**. Universidade Federal de Santa Catarina: LABEE, 2019. Acesso em 14 de jun. de 2019 <http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/arquivos_climaticos/2016.zip>

LEITE, L. et al. Desempenho térmico e conforto de construções vernáculas em madeira – os palheiros de Mira. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE REABILITAÇÃO URBANA E CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL: do edifício para a escala urbana, 2., 2017, Lisboa. **Anais...** Lisboa: Repositório U. M. 2017.

RAMOS, N. M. **A importância da inércia higroscópica no comportamento higratérmico dos edifícios**. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 2007.

WUFI. WUFI® Pro 6.3. Disponível em: <<https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>>. Acesso em: 02 jun. 2019.

ZANONI, V.A.G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higratérmico de fachadas em Brasília**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da UnB, Brasília, DF, 2015.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq) e ao Fundo de Incentivo à Pesquisa (FIPE-CT) pelo apoio financeiro.