INFLUÊNCIA DA ORIENTAÇÃO SOLAR NO COMPORTAMENTO HIGROTÉRMICO DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO EXTERNA EM LIGHT STEEL FRAME NA ZONA BIOCLIMÁTICA 3

Liliane Bonadiman Buligon (1); Bruna Zambonato (2); Selton Fernandes de Sousa Lima (3); Giane de Campos Grigoletti (4)

(1) Engenheira civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, libbonadimam@gmail.com, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria - RS, 97105-900, 55 99604 1763

(2) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, zambonato.bruna@acad.ufsm.br, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 99662 7716

(3) Engenheiro civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, seltonfernandes@gmail.com, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria – RS, 97105-900, 55 99924 1542

(4) Doutora, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, giane.c.grigoletti@ufsm.br Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria - RS, 97105-900, 55 99686 8576

RESUMO

Em sistemas *Light Steel Frame* (LSF), painéis de vedação podem ter seu desempenho térmico e durabilidade afetados pela presença de água, o que evidencia a necessidade de avaliação do comportamento higrotérmico. Os elementos climáticos variam conforme a orientação solar e a localização, exercendo influência sobre o comportamento higrotérmico da envoltória. Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da orientação solar no comportamento higrotérmico de dois sistemas em LSF na Zona Bioclimática Brasileira 3, com o programa WUFI Pro. Para isso, foi realizada a caracterização das condições climáticas de Porto Alegre – RS, e definidos os sistemas de vedação SVVE1 e SVVE2. Então, foi realizada a simulação higrotérmica e avaliados os resultados de fluxos de umidade, risco de condensação pela umidade relativa e o risco de formação de mofo. Os resultados mostram que em ambos os sistemas, as orientações Sul e Leste apresentaram os maiores valores de teor de umidade. Observou-se ainda que há risco de condensação nos dois sistemas, com intensidades diferentes de acordo com a orientação solar. Para o SVVE1 todas as orientações apresentam risco de crescimento de mofo, enquanto o SVVE2 apresentou menor risco. Portanto, a orientação da fachada tem impacto significativo no comportamento higrotérmico do sistema de vedação vertical externa.

Palavras-chave: Simulação higrotérmica, WUFI, light steel frame, umidade.

ABSTRACT

In Light Steel Frame (LSF) systems, sealing panels may have their thermal performance and durability affected by the presence of water, increasing the need to assess hygrothermal behavior. Climatic elements vary according to the solar orientation and location, influencing the hygrothermal behavior of the envelope. This work aims to evaluate the influence of solar orientation on the hygrothermal behavior of two systems in LSF in the Brazilian Bioclimatic Zone 3, by using the software WUFI Pro. For that, the climatic conditions of Porto Alegre - RS were characterized, and the SVVE1 and SVVE2 systems were defined. Then, the hygrothermal simulation was performed and the results of moisture flows, risk of condensation by relative humidity and the risk of mold formation were evaluated. The results show that in both systems, the East and South orientations presented the highest values of moisture content. It was also observed that there is a risk of condensation in both systems, with different intensities according to the solar orientation. For SVVE1, all solar orientations present a risk of mold growth, while SVVE2 presented less risk. Therefore, the orientation of the facade has a significant impact on the hygrothermal behavior of the external vertical sealing system.

Keywords: hygrothermal simulation, WUFI, light steel frame, moisture.

1. INTRODUÇÃO

O uso de sistemas construtivos inovadores, como alternativa aos sistemas tradicionais, pode gerar impactos positivos na construção civil. Sistemas industrializados, como o *Light Steel Frame* (LSF), permitem a redução do consumo de insumos e mão-de-obra, redução da geração de resíduos e do prazo de construção (OLIVIERI *et al.*, 2017). Ainda, o resíduo da construção em LSF é altamente reciclável e pode retornar para a cadeia produtiva de outras indústrias da construção (CONAMA, 2002). A adoção destes sistemas pode contribuir para a redução do impacto ambiental causado pelo setor construtivo, um dos principais responsáveis pelo consumo de recursos naturais e produção de resíduos (WORLD BANK GROUP, 2018).

O LSF é um sistema construtivo estruturado por perfis de aço zincado conformados a frio, com fechamentos em chapas delgadas (BRASIL, 2016a). Formado por três subsistemas principais (perfis metálicos, fechamento e isolamento) e materiais complementares (juntas, fixações, membranas impermeáveis e acabamentos) (SOARES *et al.*, 2017), é possível combinar diferentes materiais e espessuras a fim de atender níveis de desempenho adequados para cada contexto, o que torna o sistema flexível e versátil (CHAN; FONTANINI, 2017).

Gomes (2007) avaliou o desempenho térmico de uma edificação unifamiliar em LSF, variando as composições dos painéis utilizados como fechamento (placa cimentícia, placa de gesso acartonado, OSB, entre outros materiais). A pesquisa foi realizada por meio da simulação computacional com o software EnergyPlus para as 8 Zonas Bioclimáticas Brasileiras. Constatou-se que fechamentos com atraso térmico em conformidade com a NBR 15220 (ABNT, 2005) foram capazes de amortecer os picos de calor durante o dia típico de verão em todos os cenários.

Os componentes mais comuns utilizados neste sistema são o painel OSB e placa de gesso, para o fechamento externo e interno, respectivamente, e a lã mineral, utilizada como isolante térmico principalmente entre os montantes de perfis metálicos (SOARES *et al.*, 2017). O poliestireno expandido (EPS), também é utilizado formando sistemas de isolamento térmico pelo exterior dos montantes, o que minimiza as pontes térmicas dos perfis metálicos e melhora o desempenho térmico (ROQUE; SANTOS, 2017). Entretanto, o comportamento térmico desses sistemas, principalmente os compostos por camadas de isolamento, tende a ser afetado pela presença de água, o que prejudica o desempenho térmico e a durabilidade dos materiais que compõem o sistema de vedação (PARRACHA *et al.*, 2021). Em sistemas construtivos leves, como o LSF, a existência de uma membrana hidrófuga é fundamental na composição do sistema. Esta membrana é impermeável a água, impedindo que haja infiltração da água da chuva incidente na fachada, e permeável ao vapor, permitindo que o vapor saia do sistema de vedação, o que evita condensações entre as camadas do sistema de vedação (SILVA; OLIVEIRA, 2019).

Mesmo com a inserção da membrana impermeável, ainda é possível que ocorra a condensação do sistema, devido a infiltração de ar nos espaços entre as placas de vedação (JANSSENS; HENS, 2003), assim como entre o sistema de vedação e o piso, esquadrias e cobertura, dependendo do nível de estanqueidade da execução. A falta do controle de umidade no sistema pode afetar o consumo energético, as condições ambientais e a qualidade do ar interno dos ambientes, levando ao crescimento de micro-organismos (fungos e mofos) prejudiciais à saúde do usuário, bem como afetar a durabilidade e manutenção dos materiais que compõem a envoltória da edificação (NASCIMENTO *et al.*, 2019; ZHANG; RICHMAN, 2020).

O estudo do comportamento higrotérmico permite a avaliação dos fluxos de umidade, da variação de temperatura, do risco de condensação e do risco de formação de mofo no sistema de vedação. Variáveis como temperatura, umidade relativa, radiação solar, precipitação, velocidade e direção do vento são determinantes para estas análises (JORNE, 2010). Estes parâmetros variam de acordo com a orientação geográfica e clima local, afetando, consequentemente, o comportamento higrotérmico da envoltória (NIEMINEN; SALONVAARA, 2000).

Maia, Ramos e Veiga (2018) avaliaram o desempenho higrotérmico de três fechamentos com isolante térmico, para três climas europeus, para as orientações norte e sul. Os resultados mostraram variações no risco de condensação entre as orientações norte e sul, principalmente para o clima de Porto (Portugal), em que há maior radiação solar, se comparado com as outras cidades analisadas (Nancy e Oslo). O resultado é similar ao encontrado por Barreira e Freitas (2014) que avaliaram os parâmetros críticos para o comportamento higrotérmico superficial de sistemas de vedação externa com isolante térmico para o clima de Porto, Portugal. Apesar de a orientação não ter influência direta no risco de condensação, teve impacto na presença de umidade da parede devido à incidência de chuva dirigida e de radiação solar.

Durante o dia, a temperatura superficial da parede depende da radiação solar recebida. Fachadas que não recebem radiação solar direta tendem a ter temperatura superficial abaixo da temperatura do ar durante o dia todo, e apresentam maior risco de condensação visto que a temperatura superficial pode facilmente ficar abaixo da temperatura do ponto de orvalho, ocasionando condensação. Já as fachadas que recebem radiação

solar direta, tendem a ter temperaturas mais altas, o que diminui o risco de condensação (HOLM; ZILLIG; KÜNZEL, 2004; ZILLIG *et al.*, 2003). Além disso, a incidência de radiação solar contribui para o processo de secagem da fachada (BARREIRA; FREITAS, 2014).

Por fim, a incidência de chuva dirigida também afeta o desempenho higrotérmico de fachadas. Importante fonte de umidade, a chuva dirigida tem efeito nas superfícies que estão na direção do vento (BARREIRA; FREITAS, 2014). Além da relação com a orientação, este fator também depende da região, visto que a direção do vento difere de região para região (HOLM; ZILLIG; KÜNZEL, 2004).

No Brasil, sistemas construtivos em LSF são regulamentados pelo Sistema Nacional de Avaliações Técnicas (SINAT) e documentos complementares, propostos para suprir provisoriamente lacunas da normalização técnica, para a avaliação de novos produtos ainda não abrangidos por normas técnicas prescritivas (PBQP-H, 2021). Os sistemas de vedação em LSF são regulamentados pela Diretriz SINAT n. 009 (BRASIL, 2016b), que apresenta a configuração geral do sistema, requisitos e critérios de desempenho e durabilidade, métodos de avaliação e controle da qualidade na montagem. Apesar de a diretriz indicar critérios mínimos de desempenho para sistemas de vedação vertical externa em LSF, a diretriz não aponta índices específicos em relação ao desempenho higrotérmico. Desse modo, a análise higrotérmica de painéis pré-fabricados torna-se uma importante ferramenta para auxiliar na escolha de materiais e na previsão de possíveis patologias em uma edificação (PASZTORY *et al.*, 2012) assim como, na garantia da qualidade do ar interno (ZHANG; RICHMAN, 2020).

Portanto, as condições climáticas locais têm influência no comportamento higrotérmico de painéis de vedação vertical, principalmente pela exposição à umidade devido à chuva dirigida, que pode variar conforme a orientação solar do painel. Além disso, trabalhos relacionados ao desempenho higrotérmico de painéis de vedação vertical de *Light Steel Frame* ainda são escassos no Brasil. Assim, a simulação considerando o clima de Porto Alegre, localizado na Zona Bioclimática 3, pode contribuir para a literatura sobre o tema no Brasil.

2. OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a influência da orientação solar no comportamento higrotérmico de dois sistemas de vedação vertical externa em *Light Steel Frame* na Zona Bioclimática Brasileira 3 (ZB3), a partir de simulação computacional com o programa WUFI Pro (Versão 6.5).

3. MÉTODO

Os procedimentos metodológicos foram realizados por meio de simulação computacional para a avaliação dos fluxos de umidade, risco de condensação de vapor e formação de mofo nos dois sistemas de vedação em *Light Steel Frame* inseridos na ZB3. O método foi conduzido em quatro etapas: caracterização das condições climáticas, definição dos sistemas construtivos de vedação, simulação higrotérmica e definição dos critérios de avaliação.

3.1. Condições climáticas

As simulações foram elaboradas considerando o clima de Porto Alegre, RS, definido por pertencer à ZB3 e ter arquivo climático disponível para a análise do comportamento higrotérmico no programa WUFI Pro (versão 6.5). O município está localizado na latitude 30,03ºS, longitude 62,23ºO e altitude 47m (LABEEE, 2020). A Figura 1 apresenta os dados referentes a temperatura, umidade relativa, somatório da radiação solar e somatório da chuva incidente.

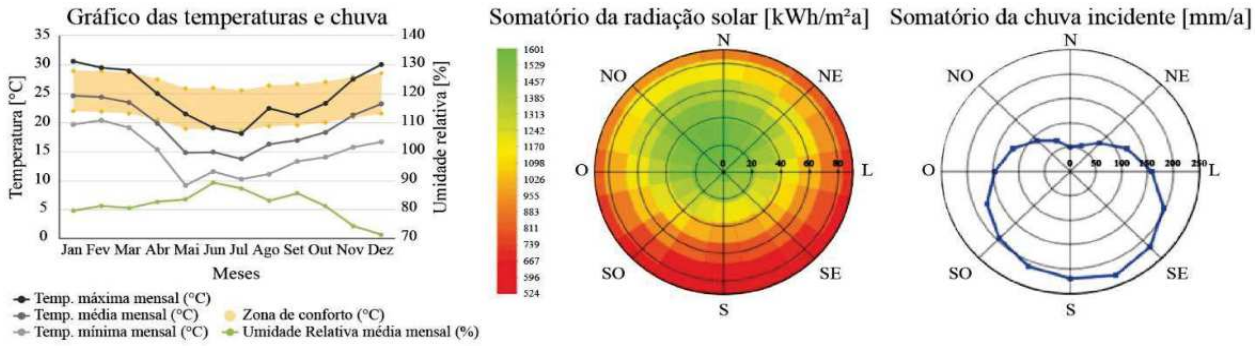


Figura 1 – Dados climáticos de Porto Alegre. RS (LABEEE, 2020).

3.2. Sistemas construtivos de vedação

Os sistemas construtivos selecionados foram definidos segundo a configuração geral indicada na Diretriz SINAT n. 009 para fachadas leves em *Steel Frame* (BRASIL, 2016b), representada na Figura 2. A espessura da camada formada por perfis montantes metálicos foi definida a partir do sistema construtivo "Placa de gesso 1,25 cm | Painel isolante mineral 9 cm | Placa cimentícia 1 cm" do Anexo V da Portaria n° 50/2013 do INMETRO (2013). Foi considerado, portanto, um perfil montante de 9 cm.

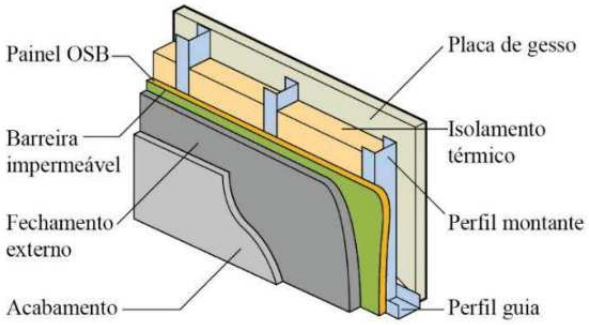
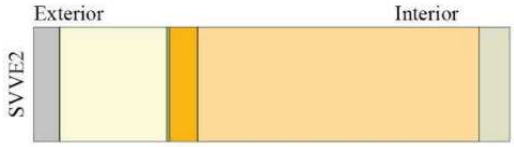


Figura 2 – Exemplo de composição de estrutura básica do SVEE. Fonte: Adaptado (BRASIL, 2016b).

Os sistemas de vedação vertical externa (SVVE) avaliados são compostos por camada interna de placas de gesso, isolamento térmico (preenchendo os vãos entre os montantes), painel OSB, membrana hidrófuga, fechamento externo e acabamento. O SVVE1 terá, como fechamento externo a placa cimentícia, amplamente utilizada na construção em LSF no país, e o SVVE2 terá como fechamento externo poliestireno expandido (EPS), que forma o sistema conhecido como EIFS (EIFS – *Exterior Insulation and Finishing System*), com inserção mais recente no mercado brasileiro. O Quadro 1 apresenta a descrição completa do SVEE1 e SVEE2, e a Tabela 1 apresenta as propriedades físicas de cada material, obtidas na biblioteca digital disponibilizada pelo programa WUFI. A transmitância térmica (U) dos sistemas foi calculada conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005).

Quadro 1 – Descrição do sistema construtivo e propriedades dos materiais.

Representação do sistema construtivo	Descrição	U [W/m²K]
	Argamassa de cimento e cal (fina) (1,0 cm) Placa de cimento (1,0 cm) Membrana hidrófuga (1,0 cm) Placa OSB (1,1 cm) Painel isolante mineral (0,9 cm) Placa de gesso acartonado (1,25m)	0,443
	Argamassa de cimento e cal (fina) (1,0 cm) Poliestireno expandido (EPS) (4,2 cm) Membrana hidrófuga (0,1 cm) Placa OSB (1,1 cm) Manta mineral (0,9 cm) Placa de gesso acartonado (1,25 cm)	0,306

Fonte: Adaptado de (WUFI PRO 6.5, 2021).

Tabela 1 – Propriedades dos materiais construtivos utilizados.

Material/Propriedade	Densidade aparente [kg/m³]	Porosidade [m³/m³]	Calor específico [J/(kg.K)]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Fator de resistência à difusão de vapor de água
Argamassa de cimento e cal (fina)	1880	0,28	850	0,600	50
Placa de cimento	1130	0,48	840	0,255	28
Poliestireno expandido (EPS)	30	0,95	1500	0,040	50
Membrana hidrófuga	130	0,001	2300	2,300	297
Placa OSB	650	0,95	1880	0,092	812,8
Painel isolante mineral	115	0,95	850	0,043	3,4
Placa de gesso acartonado	850	0,65	870	0,163	6

Fonte: Adaptado de (WUFI PRO 6.5, 2021).

3.3. Simulação higrotérmica

A simulação computacional do comportamento higrotérmico dos sistemas de vedação foi realizada no programa WUFI Pro 6.5, uma ferramenta de cálculo computacional unidimensional. Desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer em Física da Construção (IPB), este é um dos programas comerciais mais utilizados para simulação higrotérmica (CHO *et al.*, 2019; GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007; IBRAHIM *et al.*, 2014).

Foram avaliados os fluxos de umidade, risco de condensação de vapor e formação de mofo nos dois sistemas de vedação em *Light Steel Frame* verificando a influência da orientação solar no comportamento higrotérmico dos painéis. Para a simulação, foram definidos os seguintes parâmetros de configuração: orientação solar ao norte, sul, leste e oeste; edifício pequeno com altura de até 10 m; paredes externas e internas com pintura do tipo acrílica e valor de refletividade do solo (onda curta) 0,2 para valor padrão.

A chuva incidente foi calculada segundo a Norma ANSI/ASHRAE 160 "Critérios de projeto para controle da umidade em edifícios" (ASHRAE, 2016), considerando o fator de exposição à chuva (FE) 0,7 (fachada protegida pelo entorno) e fator de deposição da chuva (FD) de 0,5 (fachada não protegida por beiral). O período de análise da simulação foi de um ano com intervalo de tempo de 1 hora.

Para os dados de entrada do clima exterior foi utilizado o arquivo climático da cidade de Porto Alegre - RS, em formato TMY (*Typical Meteorological Year*) da base de dados gerada pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET de 2018 (LABEEE, 2020). A condição climática interna foi definida através das curvas senoidais, geradas pelo WUFI a partir da definição de valor médio anual, amplitude e o dia de máximo para temperatura e umidade relativa. Os valores de temperatura foram definidos a partir da faixa de conforto para Porto Alegre, considerando que a edificação garanta condições internas de conforto para os usuários, conforme Figura 1: temperatura média anual de 23,73ºC, amplitude 5,2ºC e dia de máxima em 08 de janeiro. Os valores de umidade foram definidos a partir do arquivo climático, considerando médias mensais: umidade relativa média anual de 73,48%, amplitude de 10% e dia de máxima em 27 de julho.

3.4. Critérios para avaliação

Os critérios para avaliação dos fluxos de umidade, risco de condensação de vapor e formação de mofo nos dois sistemas de vedação foram definidos a partir da literatura referente ao tema, indicados a seguir.

3.4.1. Fluxos de umidade

O teor de umidade e a taxa de secagem indicam a habilidade do sistema de secar ao longo do tempo. A avaliação do teor de umidade é feita por meio da comparação do teor de umidade final com o teor de umidade inicial. Esta análise tem relação com o tempo que o elemento levará até secar, e depende de características como a quantidade de água na produção do material, chuva incidente na parede, incidência de radiação, entre outros. O WUFI apresenta, como padrão, valores típicos da umidade de construção inicial, *build-in moisture* (kg/m³). Se o teor de umidade ao final da simulação for maior que o teor de umidade inicial, há risco de ocorrência de degradação no material, pois indica que há acúmulo de umidade (JORNE, 2010). Além disso, o teor de umidade de materiais a base de madeira, como o OSB, não deve exceder 20% em termos de densidade, pois acima disto há possibilidade de degradação e problemas de umidade (PARK *et al.*, 2019). O uso de membrana hidrófuga auxilia no controle de fluxos de umidade, pois impede que a umidade vinda da chuva incidente passe para as demais camadas do sistema de vedação, e permite a saída de vapor do ambiente interno. As camadas externas de sistemas de vedação com barreira hidrófuga costumam apresentar maior teor de umidade ao longo do tempo, pois recebem a chuva incidente e absorvem o vapor vindo das camadas internas, enquanto camadas internas costumam secar ao longo do tempo.

3.4.2. Risco de condensação pela umidade relativa

O risco de condensação no sistema pode ser avaliado a partir da umidade relativa. Quando a umidade relativa atinge o valor de 100%, há condensação. No entanto, é possível haver presença de umidade e degradação com umidade relativa abaixo de 100% para materiais higroscópicos, como a madeira, que pode apresentar crescimento de fungos e mofo para valores de umidade relativa de 90%. Normas em que o WUFI se baseia determinam como critério para identificar a presença de água líquida, o teor de água entre camadas deve ser abaixo de 0,5 kg/m² e a umidade relativa na superfície interior deve permanecer abaixo de 80% para evitar o crescimento de fungos (JORNE, 2010).

3.4.3. Risco de formação de mofo

O risco de formação de mofo pode ser avaliado por meio das curvas LIM (*Lowest Isopleth for Mold*) que representam o limite para o risco de crescimento de mofo. Pontos acima da curva apresentam condições de temperatura e umidade relativa favoráveis ao crescimento de mofo. É preferível que a maior parte dos

pontos fiquem abaixo desta curva. A curva LIM B I representa materiais biodegradáveis, acabamentos, como a placa de gesso (superfície interna do SVVE1 e SVVE2) e a curva LIM B II representa materiais porosos, como rebocos, materiais minerais, algumas madeiras e alguns materiais isolantes (AKSAMIJA, 2013).

4. RESULTADOS

A partir da simulação com o programa WUFI Pro 6.5, foram obtidos os resultados para a avaliação higrotérmica dos sistemas de vedação vertical externa analisados. Na Figura 3 são apresentados os teores de umidade total dos sistemas SVVE1 e SVVE2 para as orientações norte, sul, leste e oeste no decorrer de um ano. O teor de umidade teve um aumento ao longo do período de simulação para ambos os sistemas. A variação do teor de umidade inicial e final foi maior para o sistema SVVE1 do que para o sistema SVVE2, o que indica que o sistema composto por placa cimentícia tem a tendência a acumular mais umidade em seu interior, contribuindo para a degradação do material e à necessidade de manutenção mais frequente do que para o sistema composto por EPS.

Em relação à orientação solar, as diferenças também foram mais significativas para o SVVE1. A orientação solar Norte apresenta o menor teor de umidade total ao longo do período de simulação, devido à grande incidência de radiação solar desta orientação, além de ser a face oposta à orientação de maior incidência de ventos e chuva. As orientações Leste e Sul apresentaram os maiores valores de teor de umidade, por serem as faces que recebem maior incidência de chuva e vento, bem como recebem a menor incidência de radiação solar. O comportamento quanto ao teor de umidade total apresentou o mesmo padrão para ambos os sistemas, variando apenas a intensidade, devido às características físicas dos materiais de cada sistema.

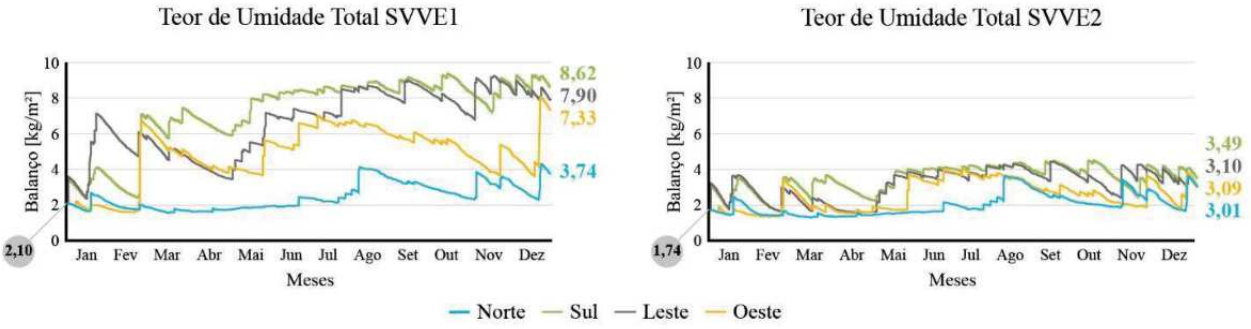


Figura 3 – Teor de umidade total para os sistemas SVVE1 e SVVE2.

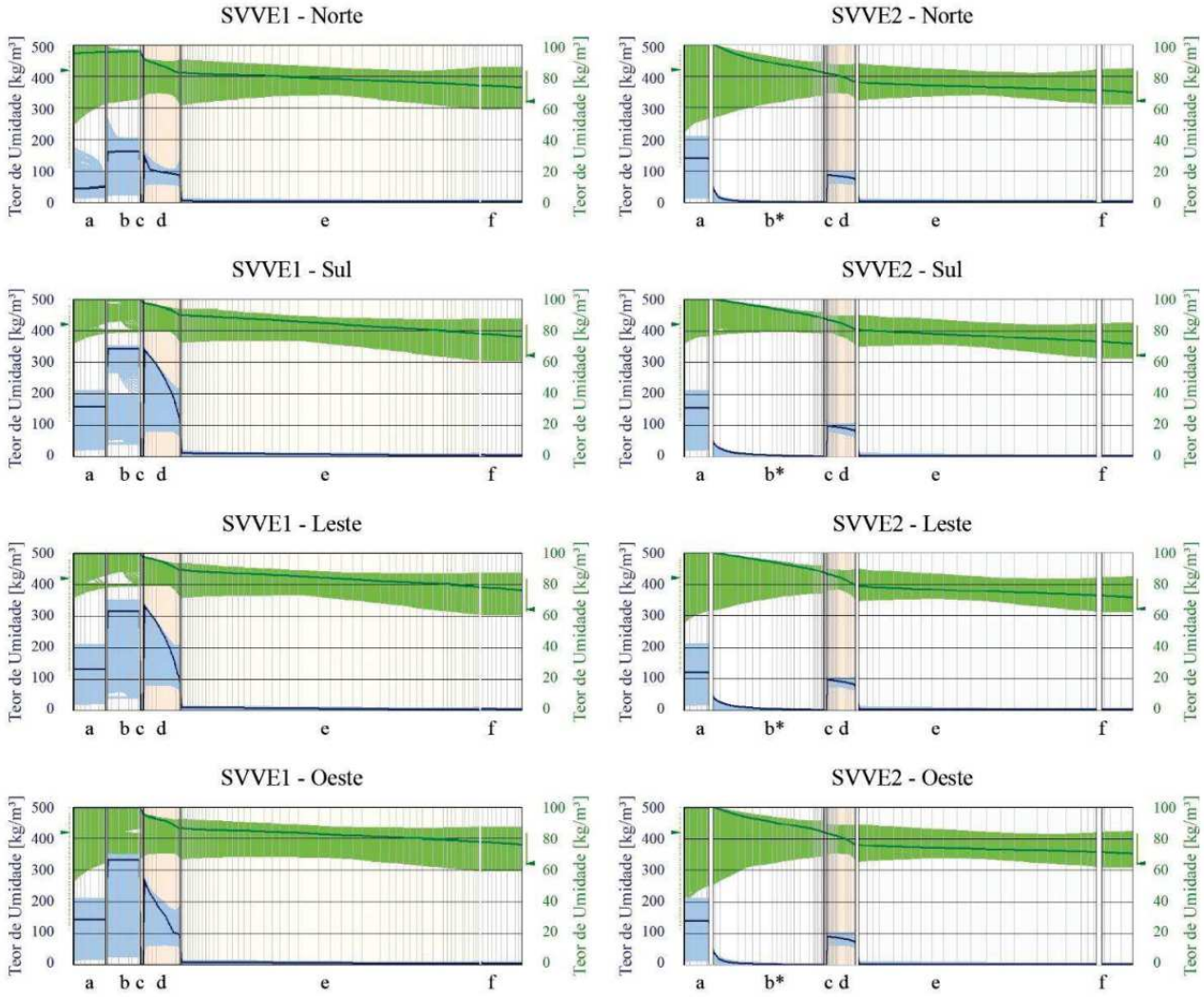
A Figura 4 apresenta o teor de umidade e a umidade relativa durante o período de simulação. As linhas azul e verde representam, respectivamente, o teor de umidade e a umidade relativa dos sistemas construtivos ao final do período de simulação. Já as manchas azul e verde representam, respectivamente, os valores máximos e mínimos de teor de umidade e umidade relativa atingidos em cada posição dos sistemas construtivos ao longo do período de simulação. Observa-se que as camadas situadas à esquerda (exterior) da barreira hidrófuga apresentam os maiores níveis de teor de umidade e umidade relativa, bem como as maiores oscilações, representadas pelas manchas, como observado em Aksamija (2013). Isso ocorre devido à absorção da chuva incidente e ao recebimento do vapor vindo do interior da edificação.

A membrana hidrófuga e a camada de OSB estão na zona de transição entre o interior e exterior. Estas camadas têm efeito significativo no controle da umidade, devido à alta resistência à difusão de vapor de água. São observadas reduções de 10% na umidade relativa para ambos os sistemas, cerca de 200kg/m³ de teor de umidade para o sistema SVVE1 e 20kg/m³ para o sistema SVVE2. O teor de umidade na camada de OSB excedeu 20% da sua densidade (130kg/m³) em alguns momentos para o SVVE1, com maior extrapolação para a orientação Sul, seguida de Leste, Oeste e Norte. Há, portanto, risco de condensação e degradação do material caso o excesso de umidade ocorra por longos períodos. A análise do período em que o teor de umidade excede os limites admissíveis é importante para identificar se o material vai secar com o tempo, antes de haver degradação, ou se esta umidade permanecerá por longo período, danificando o material.

Além disso, a camada de EPS, no sistema SVVE2, tem grande contribuição para o controle de umidade nas demais camadas internas, e no sistema como um todo. Devido às características físicas e sua alta resistência à difusão de vapor d'água, o teor de umidade e a umidade relativa são reduzidos consideravelmente antes de atingir a membrana hidrófuga, e consequentemente ao longo das demais camadas internas, que apresentam menor teor de umidade e umidade relativa, resultando em menor risco de condensação.

A Figura 4 indica risco de condensação tanto para o SVVE1 quanto para SVVE2, uma vez que a camada da placa OSB apresentou umidade relativa acima de 80% em alguns períodos da simulação, com intensidades

diferentes de acordo com a orientação solar. A orientação norte apresentou o menor risco de condensação, se comparado com as demais orientações, seguido da orientação Oeste, Leste e Sul, similar ao que foi encontrado por Holm, Zillig e Kunzel (2004). Da mesma forma, a orientação norte apresentou maior variação de umidade relativa ao longo da simulação (apresentando maiores manchas verdes), enquanto a orientação sul se mostrou mais constante (menores manchas verdes). Isso pode ser resultado da diferença de radiação solar direta que cada orientação recebe, tornando o comportamento higrotérmico para a fachada norte mais variável e para a fachada sul mais constante.



Nota: a) Argamassa de cimento e cal (fina); b) Placa de cimento; b*) Poliestireno expandido (EPS); c) Membrana hidrófuga; d) Placa OSB; e) Painel isolante mineral; f) Placa de gesso acartonado

Figura 4 – Risco de condensação.

A Figura 5 apresenta o gráfico de risco de formação de mofo na face interior dos sistemas construtivos, referente às quatro orientações. Os pontos representam as condições higrotérmicas na superfície interna do componente construtivo em um determinado momento. A cor de cada ponto indica em que momento esse ponto ocorreu durante a simulação, os amarelos ocorrem no início do cálculo higrotérmico, seguidos pelos tons de verde e os últimos pontos, de cor preta, representam o final do cálculo. Essa nuvem de pontos permite analisar a tendência a longo prazo da simulação.

De acordo com a curva LIM B I, as paredes apresentam risco quando a umidade relativa (UR) é superior a 80% a uma temperatura interna de 20°C. Para o SVVE1 todas as orientações apresentam risco de crescimento de mofo, onde a nuvem de pontos se encontra na condição acima da LIM B I, do meio ao final do cálculo higrotérmico (pontos pretos), sendo a orientação Norte a menos crítica em relação às demais. O SVVE2 apresentou pouco risco de crescimento de mofo, sendo necessário investigações mais detalhadas do tempo em que o sistema ficou exposto a condições de umidade relativa e temperatura favoráveis ao crescimento de mofo para uma avaliação mais definitiva.

Tanto para SVVE1 quanto para SVVE2, os pontos acima da curva LIMB1 apresentam cor verde com tom intermediário, verde escuro e preto, o que indica que há maior risco no período intermediário de simulação para o final, correspondente ao inverno e primavera para o clima simulado. Isso pode ocorrer devido à alta umidade relativa e a menor incidência de radiação solar neste período, para o clima analisado. Após o período de inverno, a umidade contida no SVVE tende a ser gradativamente reduzida nos meses seguintes de menor umidade relativa, maior incidência de radiação solar e maiores temperaturas.

O risco de condensação e de mofo dos sistemas analisados depende principalmente do seu processo de secagem a longo prazo (BARREIRA; FREITAS, 2016). Pode-se observar que a orientação sul apresentou o maior acúmulo de umidade ao longo do tempo (Figura 3) e consequentemente o maior risco de condensação (Figura 4) e formação de mofo (Figura 5). Este resultado já era esperado, visto que a orientação solar sul apresenta alta incidência de chuva dirigida e menos radiação solar direta, sendo mais crítica para o clima analisado. Os resultados indicam a coerência do método de simulação em relação à realidade, bem como a possibilidade de uso de sistemas de fechamentos variados para diferentes orientações solares, de acordo com o desempenho higrotérmico.

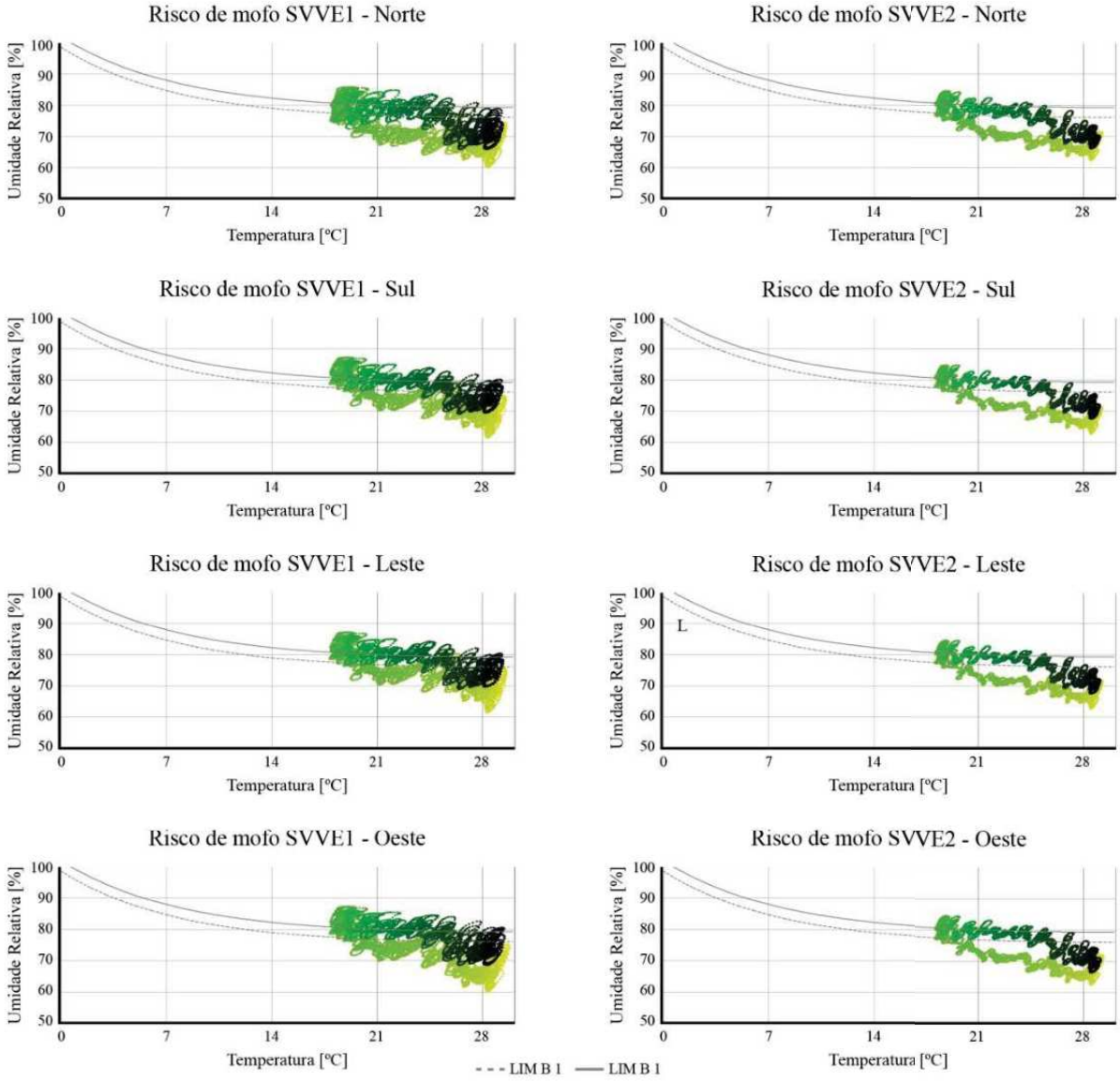


Figura 5 – Risco de mofo nos sistemas SVVE1 e SVVE2.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou o comportamento higrotérmico de dois sistemas de vedação vertical externa, um com fechamento em placa cimentícia e outro com fechamento em EPS, para as orientações norte, sul, leste e oeste, para a Zona Bioclimática 3. A análise foi feita por meio de simulação computacional utilizando o programa WUFI Pro (versão 6.5), com o arquivo climático de Porto Alegre, RS, representativo da ZB3.

Os resultados indicam que a orientação da fachada tem impacto significativo no comportamento higrotérmico do sistema de vedação vertical externa. Esses resultados são esperados, uma vez que a radiação solar e a chuva impulsionada pelo vento influenciam no percentual de umidade relativa dentro da envoltória do edifício e na transferência de umidade resultante através sistema construtivo. A orientação sul, que recebe a maior incidência de chuva e menor radiação solar direta, acumulou maior teor de umidade no sistema, bem como apresentou maiores riscos de condensação e de crescimento de mofo tanto para o SVVE1 quanto para o SVVE2. Sistemas de vedação nesta orientação devem ser projetados com atenção ao desempenho higrotérmico e aos efeitos da presença de umidade como qualidade do ar interno, durabilidade, manutenção e desempenho térmico. A orientação leste apresentou resultados muito próximos da orientação sul, para ambos os sistemas. E as orientações oeste e norte apresentaram resultados menos críticos, sendo a orientação norte a que apresentou menor teor de umidade acumulado, menor risco de condensação e de crescimento de mofo.

Entre os sistemas analisados, o SVVE2 apresentou os melhores resultados para os critérios analisados, devido às características físicas do EPS, que permitem maior controle de umidade no sistema como um todo. É recomendável, portanto, o uso do SVVE2 em orientações e situações mais críticas de exposição à umidade. É importante ressaltar, no entanto, que o desempenho identificado neste trabalho, por meio de simulação, pode ter grande influência da execução, especialmente na realização das junções e fixações, que podem comprometer a estanqueidade do sistema.

Como principal limitação do trabalho, destaca-se a utilização das curvas senoidais para a caracterização do clima interno. Em trabalhos futuros, é recomendável realizar a simulação higrotérmica considerando também os demais formatos de clima interno sugeridos pelo programa. Além disso, é possível realizar a avaliação dos painéis para as demais Zonas Bioclimáticas Brasileiras, a fim de verificar o seu desempenho sob diferentes condições climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2 Desempenho térmico de edificações, Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraaso térmico, e do fator solar de elementos e componentes de edifciações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

AKSAMIJA, A. **Sustainable Facades: Design methods for high-performace building envelopes**. Hoboken: John Wiley and Sons, 2013.

ASHRAE. **ASHRAE Standard 160: Criteria for moisture - control design analysis in buildings**. Atlan: ANSI/ASHRAE, 2016.

BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. De. Evaluation of Surface Humidification of Exterior Insulation and Finish Systems. **J. Perform. Constr. Facil.**, [*s. l.*], v. 30, n. 2, p. 04015026, 2016.

BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. De. External Thermal Insulation Composite Systems : Critical Parameters for Surface Hygrothermal Behaviour. [*s. l.*], v. 2014, 2014.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretriz SINAT n. 003 - Rev. 2. Sistemas construtivos estruturados em perfis leves de aço zincado conformado a frio com fechamentos em chapas delgadas (sistemas leves tipo "Light Steel Framing")**. Brasília: Ministério das Cidades, 2016a.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Diretriz SINAT n. 009 - Rev. 01. Sistema de vedação vertical externa, sem função estrutural, multicamadas, formado por perfis leves de aço zincado e fechamentos em chapas delgadas com revestimento de argamassa (fachada leve em steel frame)**. Brasília: Ministério das Cidades, 2016b.

CHAN, D. K.; FONTANINI, P. S. P. Análise do uso do sistema light steel frame na construção civil. *In*: TECSIC WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E S, 1., 2017, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: Galoá, 2017.

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

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução n. 307, de 5 de julho de 2002**. Brasília: [*s. n.*], 2002.

GIARMA, C.; BIKAS, D.; ARAVANTINOS, D. Hygrothermal profiles of building elements in the context of service life design. *In*: PORTUGAL SB 2007, 2007, Amsterdam. **Portugal SB 2007 - Sustainable Construction, Materials and Practices: Challenge of the Industry for the New Millennium**. Amsterdam: IOS Press, 2007. p. 553–560.

GOMES, A. P. Avaliação Do Desempenho Térmico De Edificações Unifamiliares Em Light Steel Framing. [*s. l.*], p. 172, 2007.

HOLM, A.; ZILLIG, W.; KÜNZEL, H. M. Exterior surface temperature and humidity of walls: Comparison of experiment and numerical simulation. *In*: BUILDINGS CONFERENCE, 9., 2004, Clearwater Beach. **Proceedings of the ASHRAE conference on the Performance of Exterior Envelopes ofWhole Buildings**. Clearwater Beach: ASHRAE, 2004.

IBRAHIM, M. *et al.* Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 84, p. 241–251, 2014.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA QUALIDADE E TECNOLOGIA. Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros. **Anexo Da Portaria Inmetro Nº 50/ 2013**, [*s. l.*], p. 134, 2013.

JANSSENS, A.; HENS, H. Interstitial Condensation Due to Air Leakage: A Sensitivity Analysis. **Journal of Building Physics**, [*s. l.*], v. 27, n. 1, p. 15–29, 2003.

JORNE, F. J. F. **Análise do comportamento higrotérmico de soluções construtivas de paredes em regime variável**. 176 f. 2010. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

LABEEE - LABORATÓRIO DE EFICIÊNICA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES. **Arquivos Climáticos: INMET 2016**. [*S. l.*], 2020. Available at: http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2016. Acesso em: 12 maio 2020.

MAIA, J.; RAMOS, N. M. M.; VEIGA, R. Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems. [*s. l.*], v. 144, n. August, p. 437–449, 2018.

NASCIMENTO, M. *et al.* Hygrothermal simulation: Use for service life prediction and maintenance of façades. **WIT Transactions on the Built Environment**, [*s. l.*], v. 183, p. 139–149, 2019.
NIEMINEN, J.; SALONVAARA, M. **Hygrothermal performance of light steel-framed walls, Espo 2000Technical Research Centre of Finland**. Oramedia Oy: VTT Tiedottetia, 2000.
OLIVIERI, H. *et al.* A utilização de novos sistemas construtivos para a redução no uso de insumos nos canteiros de obras: Light Steel Framing. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 4, p. 45–60, 2017.
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**, [*s. l.*], v. 204, p. 576–585, 2019.
PARRACHA, J. L. *et al.* Performance parameters of ETICS : Correlating water resistance , bio-susceptibility and surface properties. [*s. l.*], v. 272, 2021.
PASZTORY, Z. *et al.* Modeling the hygrothermal performance of selected North American and comparable European wood-frame house walls. **Energy and Buildings**, [*s. l.*], v. 49, p. 142–147, 2012.
PBQP-H. PROGRAMA BRASILEIRO DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT. **Sistema Nacional de Avaliações Técnicas - SINAT**. [*S. l.*], 2021. Available at: http://pbqp-h.mdr.gov.br/projetos_sinat.php. Acesso em: 30 mar. 2021.
ROQUE, E.; SANTOS, P. The effectiveness of thermal insulation in lightweight steel-framed walls with respect to its position. **Buildings**, [*s. l.*], v. 7, n. 13, 2017.
SILVA, F. B.; OLIVEIRA, L. A. De. Características técnicas de barreiras resistentes à água para aplicação em fachadas no Brasil. *In*: TECSIC WORKSHOP DE TECNOLOGIA DE PROCESSOS E S, 2., 2019, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: ANTAC, 2019.
SOARES, N. *et al.* Energy e ffi ciency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction : A review. [*s. l.*], v. 78, n. April, p. 194–209, 2017.
WORLD BANK GROUP. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington: World Bank Group, 2018.
WUFI PRO 6.5. **WUFI Pro**. Versão 6.5. Stuttgart: Instituto Franhofer em Física de Edifícios, 2021.
ZHANG, K.; RICHMAN, R. Parametric analysis of moisture sorption isotherms for wood sheathing using hygrothermal modelling. **Journal of Building Engineering**, [*s. l.*], v. 28, p. 101047, 2020.
ZILLIG, W. *et al.* Condensation on façades – influence of construction type and orientation. *In*: RESEARCH IN BUILDING PHYSICS. Rotterdam: [*s. n.*], 2003. p. 437–444.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro.