

Área: Sustentabilidade | Tema: Temas Emergentes em Sustentabilidade

SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO EM MADEIRA E ALVENARIA PARA ZONA BIOCLIMÁTICA 2

HYGROTHERMAL SIMULATION WOOD AND MASONRY WALL SYSTEMS FOR BIOCLIMATE ZONE 2

Bruna Zambonato, Liliane Bonadiman Buligon, Leonardo Felipeto, João Paulo Carriconde Llovet Da Silva e

Giane De Campos Grigoletti

RESUMO

O uso de materiais de construção mais ambientalmente sustentáveis, como a madeira, pode auxiliar na redução do impacto ambiental das edificações. O Brasil é um país que tem grande produção de árvores plantadas, porém, seu uso na construção civil é ainda limitado. Diante disso são necessários estudos que investiguem e incentivem a utilização da madeira no setor. O objetivo deste trabalho foi analisar diferentes sistemas de vedação vertical em madeira e tijolo cerâmico quanto ao desempenho higrotérmico para a Zona Bioclimática 2. A metodologia baseia-se na avaliação do desempenho pela ABNT NBR 15220 e NBR 15575, utilizando o programa WUFI® como ferramenta de simulação. Foram definidos quatro sistemas construtivos de fachadas, sendo eles: lambril de madeira conífera (S1); lambril de madeira conífera + camada de ar + lã mineral + chapa de OSB (S2); reboco de argamassa + tijolo cerâmico assentado na menor dimensão + reboco de argamassa (S3); e reboco de argamassa + tijolo cerâmico assentado na maior dimensão + reboco de argamassa (S4). Como resultados, tem-se que, quanto ao desempenho térmico, apenas o sistema S1 foi reprovado, de acordo com as ABNT NBR 15220 e NBR 15575. Todos os sistemas apresentaram redução do teor de umidade total ao longo do período de simulação de dois anos, indicando que as paredes não acumulam umidade no seu interior. De modo geral, todos os sistemas apresentaram bom desempenho quanto à análise higrotérmica, mesmo em fachadas expostas a elevado nível de chuva dirigida e à baixa incidência de radiação solar.

Palavras-Chave: madeira, tijolo cerâmico, fluxo de umidade, desempenho térmico, desempenho

higrotérmico

ABSTRACT

The use of sustainable building materials, such as wood, can help reduce the environmental impact of buildings. Brazil is a country that has a large production of planted trees, but its use in civil construction is still limited. Therefore, studies are needed to investigate and encourage the use of wood in the sector. The objective of this work was to analyze different wood and masonry wall systems for hygrothermal performance for the Bioclimatic Zone 2. The methodology is based on the performance evaluation according to ABNT NBR 15220 and NBR 15575, using the WUFI® program as a simulation tool. Four façade construction systems were defined: coniferous wood paneling (S1); coniferous wood paneling + air layer + mineral wool + OSB plate (S2); mortar plaster + ceramic brick seated in the smallest side + mortar plaster (S3); and mortar plaster + ceramic brick seated in the larger side + mortar plaster (S4). As a result, it has been found that, for thermal performance, only the S1 system failed, according to ABNT NBR 15220 and NBR 15575. All systems presented a reduction of total moisture content over the two-year simulation period, indicating that the walls do not accumulate moisture inside. All systems performed satisfactorily for hygrothermal analysis, even though the façades were exposed to a high level of directed rain and low incidence of solar radiation.

Keywords: wood, masonry, moisture flow, thermal performance, hygrothermal performance

SIMULAÇÃO HIGROTÉRMICA DE SISTEMAS DE VEDAÇÃO EM MADEIRA E ALVENARIA PARA ZB2

1 INTRODUÇÃO

A demanda por pesquisas voltadas à redução do consumo energético nas edificações apresentou expressivo crescimento a partir dos anos 1990. Problemas como o aquecimento global, efeitos nas mudanças climáticas, esgotamento de recursos naturais e políticas energéticas são alvo de constante discussão em diversas esferas da sociedade, inclusive no setor da construção civil. No ano de 2017, atividades de construção e operação de edificações foram responsáveis pelo consumo de cerca de 36% da energia produzida no mundo e pela emissão de 39% de dióxido de carbono (IEA et al., 2018).

Os dados apresentados pela Agência Internacional de Energia, no relatório de estatísticas mundiais de energia de 2018, apontam o setor residencial como responsável por 27,1% do consumo de toda a energia elétrica no mundo (IEA, 2018). Políticas estão sendo reforçadas para reduzir o consumo energético nos edifícios. O Acordo de Paris, sobre mudanças climáticas, que inclui 195 países, definiu medidas para diminuir o consumo global de energia ambiental. O governo brasileiro comprometeu-se a reduzir em 43% as emissões de gases do efeito estufa até 2030, em relação ao ano base de 2005, por meio de ações mitigadoras que incluem o uso de fontes renováveis de energia, tecnologias limpas e medidas de eficiência energética (BRASIL, 2015). A melhoria do desempenho das edificações e a utilização de materiais sustentáveis contribuem com tais políticas e acordos ambientais.

O uso de materiais de construção ecológicos e sustentáveis, como a madeira, auxiliam na redução do impacto ambiental de edificações. O processo produtivo apresenta baixos níveis de consumo energético e auxilia na captura de gases do efeito estufa (DEMARZO; PORTO, 2007). Cada metro cúbico de madeira que substitui outro material construtivo gera uma redução média de 1,9 toneladas de gás carbônico (SATHRE; O'CONNOR, 2010). Diferente da produção de materiais de construção como aço e concreto, que utilizam matéria prima fóssil, retirada do solo, a produção da madeira não agride o solo, propicia o desenvolvimento de sementes e o crescimento de florestas (RAMAGE et al, 2017).

A madeira apresenta baixa condutividade térmica e propriedades estruturais que permitem o uso em construções de pequeno porte até edifícios de 40 pavimentos (RAMAGE et al, 2017). Além disso, é um material abundante no Brasil, devido ao clima propício para o crescimento e desenvolvimento de espécies utilizadas na construção civil (KRONKA; DELCARLO, 2001). Apesar das diversas vantagens como material construtivo, as propriedades higroscópicas da madeira, que auxiliam no controle da umidade na edificação, também tornam o material vulnerável à condensação e crescimento de mofo gerados pela umidade (PARK, 2019).

A umidade relativa do ar de ambientes internos pode afetar o consumo energético, as condições ambientais e a qualidade do ar de edificações, bem como a durabilidade e manutenção dos materiais que compõem a envoltória (NASCIMENTO et al., 2019). Variações do clima agem de forma decisiva na degradação de materiais construtivos acelerando seu envelhecimento natural e conseqüentemente reduzindo sua vida útil (JERNBERG et al., 2004). Dessa forma, torna-se necessário avaliar o comportamento higrotérmico dos sistemas de vedação, de modo a compreender os fluxos de umidade e calor, assim como as propriedades higrotérmicas dos seus componentes (JORNE, 2010).

Devido à complexidade das variáveis envolvidas neste processo, programas de simulação computacional são uma ferramenta importante na avaliação do comportamento higrotérmico de diferentes sistemas construtivos expostos a condições de orientação e clima variados (BUSSER et al, 2019). Um dos programas de simulação mais utilizados para este fim

é o programa WUFI, que permite a simulação de transferência de calor e vapor em uma ou duas direções. O programa foi validado por testes de laboratório, garantindo a proximidade com a realidade dos cálculos de comportamento higrotérmico de paredes com múltiplas camadas, expostas a condições climáticas realistas (DELGADO et al., 2010).

O presente trabalho apresenta a avaliação do desempenho higrotérmico de quatro sistemas construtivos utilizados como vedação vertical externa em madeira e tijolo cerâmico de edificações no Brasil para a Zona Bioclimática 2 (ABNT, 2005). As simulações foram realizadas com o programa WUFI, que permite a identificação do comportamento da envoltória frente a condições climáticas e seus efeitos no ambiente interno e na durabilidade e necessidade de manutenção dos sistemas construtivos analisados.

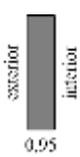
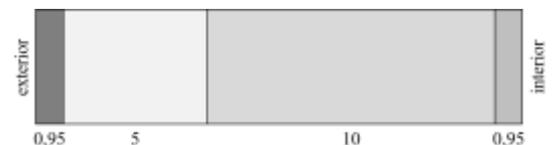
2 METODOLOGIA

Foram avaliados quatro sistemas construtivos. Dois sistemas compostos principalmente por madeira, material renovável com propriedades físicas adequadas para uso na construção civil, cuja produção, reciclagem e reuso são de baixo impacto ambiental, e dois compostos por alvenaria de tijolos cerâmicos, sistema construtivo comumente utilizado para vedação de edificações no país. A análise das propriedades higrotérmicas dos sistemas foi feita com o programa WUFI Pro, versão 6.3, desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer em Física de Edifícios (IPB), considerando o clima do município de Santa Maria, RS, o qual situa-se na Zona Bioclimática 2 (ABNT, 2005).

2.1 SISTEMAS CONSTRUTIVOS

Foram definidos quatro sistemas de vedação, dois para cada material construtivo, de acordo com sistemas de vedação vertical comumente utilizados na construção civil brasileira. Sendo assim, os sistemas construtivos analisados são S1, formado por lambril de madeira conífera; S2, formado por lambril de madeira conífera, camada de ar, lã mineral, chapa de OSB; S3, formado por reboco de argamassa, tijolo cerâmico assentado na menor dimensão, reboco de argamassa; e S4, formado por reboco de argamassa, tijolo cerâmico assentado na maior dimensão, reboco de argamassa. A Tabela 1 apresenta os sistemas de vedação e suas características – código do sistema, corte transversal, materiais e espessuras – e a Tabela 2 apresenta as propriedades dos materiais utilizados na simulação, retirados da base de dados do programa WUFI.

Tabela 1 - Descrição dos sistemas de vedação

Sistema	Corte	Materiais e espessuras
S1		Lambril (0,95cm)
S2		Lambril (0,95cm) Camada de ar (5cm) Lã mineral (10cm) Chapa OSB (0,95cm)

S3		Argamassa (2,5cm) Tijolo cerâmico (10cm) Argamassa (2,5cm)
S4		Argamassa (2,5cm) Tijolo cerâmico (15cm) Argamassa (2,5cm)

Fonte: autores.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais construtivos utilizados

Propriedade	Densidade aparente [kg/m ³]	Porosidade [m ³ /m ³]	Calor específico [J/(kg.K)]	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	Fator de resistência à difusão de vapor de água
Madeira macia (conífera)	400	0,73	1400	0,09	200
Camada de ar (5 cm)	1,3	0,99	1000	0,28	0,32
Manta mineral (ISOVER)	25,2	0,95	1000	0,35	1
Painel OSB	595	0,90	1400	0,13	165
Argamassa de cimento cal, fina	1880	0,28	850	0,60	50
Tijolo cerâmico	800	0,60	850	0,18	15

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

2.2 SIMULAÇÃO

O programa WUFI simula o transporte de calor e umidade e foi validado por meio de experimentos em laboratório, verificando a confiabilidade de cálculos realistas do comportamento higrotérmico de componentes construtivos de múltiplas camadas expostos a condições climáticas naturais (DELGADO, 2010). O desempenho higrotérmico foi avaliado por meio da análise de balanços de energia, de vapor e de ar. Estes balanços consideram fluxos de calor por condução, convecção e radiação; fluxos de vapor por difusão, convecção e transporte líquido; e fluxos de ar dirigidos naturalmente, externamente ou por forças mecânicas.

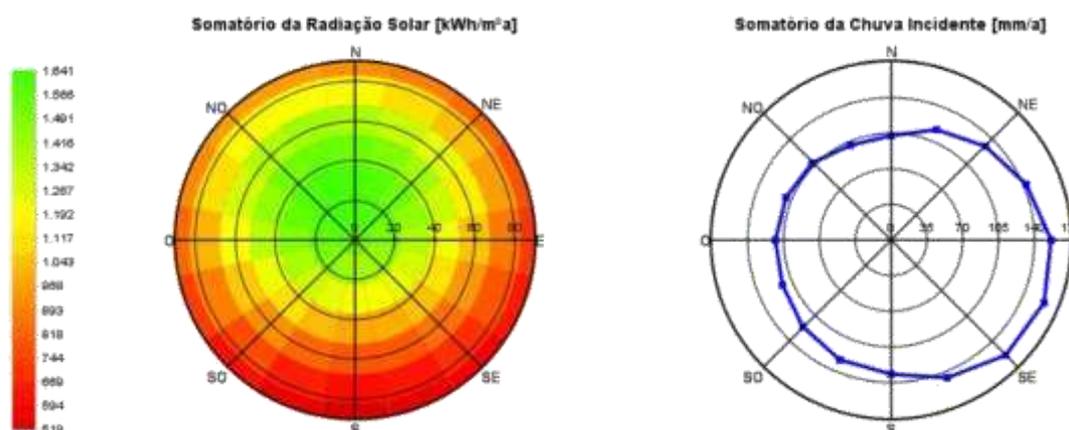
Foram definidos os seguintes dados de entrada para a simulação: orientação solar ao sul; edifício pequeno com altura de até 10 m; volume de 500m³; taxa de renovação do ar horária; paredes externas e internas com pintura do tipo acrílica; refletividade do solo (onda curta) de 0,2; fator de redução da chuva incidente de 0,2. A chuva incidente foi calculada segundo a Norma ANSI/ASHRAE 160, que trata de 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). O período da simulação foi de dois anos com intervalo de tempo de 1 hora. Apesar de os dados climáticos de referência serem para um ano,

os materiais geralmente apresentam um conteúdo de umidade inicial, então o primeiro ano de análise, isoladamente, não pode ser considerado representativo do desempenho do sistema pois ainda não houve o estabelecimento do balanço entre o componente e o entorno (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007).

2.2.1 Arquivo climático

Os dados meteorológicos são uma variável essencial para a simulação térmica de edificações, sendo único e dependente da localização do edifício analisado. O arquivo climático utilizado para a simulação foi gerado pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016). Os dados correspondem ao município de Santa Maria, RS, localizada na latitude 29,68° S, longitude 53,81° O e altitude de 95m, contendo dados de temperatura, vento e precipitação (LABEEE, 2019). A Figura 1 e a Tabela 3 apresentam os dados referentes a radiação solar, chuva incidente, temperatura e umidade relativa, com base no arquivo climático utilizado.

Figura 1 - Dados climáticos de Santa Maria, RS



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

Tabela 3 – Dados climáticos de Santa Maria, RS

Temperatura (°C)			Umidade relativa (%)		
Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
19,0	38,3	1,1	75,7	97,0	18,0
Somatório da radiação solar (kWh/m²a)	Índice de nebulosidade médio (-)	Velocidade do vento média (m/s)	Somatório da precipitação normal (mm/a)		
3177,9	0,5	2,1	890		

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

2.3 CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

A seguir são apresentados os critérios considerados para a avaliação do desempenho higrotérmico dos sistemas de vedação neste estudo.

2.3.1 Transmitância térmica

O desempenho térmico dos sistemas de vedação foi avaliado segundo critérios das normas de desempenho NBR 15220-3 (2005) e NBR 15575-4 (ABNT, 2013), para a Zona Bioclimática 2 (ZB2) – zona a qual pertence o município de Santa Maria, RS utilizado como localização para as simulações deste trabalho. A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) indica o uso de paredes leves, que apresentem transmitância térmica (U) menor ou igual a 3,0W/m²K. Já a NBR 15575-4 (ABNT, 2013) indica a U máxima admissível de 2,5W/m²K.

2.3.2 Teor de umidade total

O teor de umidade total (TUT) indica a habilidade do sistema de vedação de secar ao longo do tempo. São avaliados o teor de umidade inicial e final de cada sistema de vedação para o período de dois anos de simulação. Quando o TUT referente ao final do período de simulação é menor que o inicial, significa que a parede tem a potencialidade de secar ao longo do tempo, e então não há risco de acúmulo de umidade no sistema de vedação a longo prazo.

2.3.3 Taxa de secagem

Este critério avalia a porcentagem de secagem do sistema de vedação ao longo do período de dois anos de simulação. É a diferença entre o teor de umidade inicial (TUT_i) e o teor de umidade final (TUT_f), $(TUT_i - TUT_f) / TUT_i \times 100$, apresentado em %. Quanto maior a taxa de secagem do sistema, maior sua capacidade de secar mais rapidamente ao longo do tempo.

2.3.4 Teor de umidade por camada

A avaliação do teor de umidade por camada permite identificar onde, no sistema de vedação, há maior acumulação de umidade e, conseqüentemente, há maior risco de condensação, proliferação de fungos e deterioração dos materiais. Similar ao teor de umidade total, é positivo quando a camada apresenta teor de umidade final menor que o teor de umidade inicial.

2.3.5 Risco de condensação de vapor

O risco de condensação de vapor pode ser avaliado a partir dos índices de umidade relativa das camadas dos sistemas de vedação, de modo a identificar camadas com períodos extensos de umidade relativa elevada. Para materiais não higroscópicos e câmaras de ar, a condensação do vapor acontece quando a umidade relativa atinge o valor de 100%. No entanto para materiais higroscópicos, como a madeira, a condensação pode acontecer para umidades relativas menores que 100%. Portanto, para estes materiais, é indicado assumir o risco de condensação quando a umidade relativa ultrapassar 80% e o teor de umidade na camada ultrapassar 0,5kg/m² (JORNE, 2010).

3 RESULTADOS

Foi avaliado o desempenho higrotérmico dos sistemas, por meio da propriedade de transmitância térmica do fechamento, do teor de umidade total, da taxa de secagem, do teor de umidade em diferentes camadas dos sistemas de vedação, e do risco de condensação de vapor na parede. Os sistemas foram simulados para a orientação sul por ser a situação mais crítica em

relação ao controle de umidade devido à baixa incidência solar combinada com a alta incidência de chuva para a localização considerada neste estudo.

3.1 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Os resultados da transmitância térmica e aprovação ou não quanto ao critério de desempenho térmico das normas de desempenho NBR 15220-3 (2005) e NBR 15575-4 (ABNT, 2013) são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Transmitância térmica dos sistemas e avaliação segundo requisitos da NBR 15220-3 e 15575-4 (ABNT, 2005; 2013)

Sistema	U (W/m ² K)	Desempenho NBR 15220-3 (U ≤ 3,0W/m ² K)	Desempenho NBR 15575-4 (U ≤ 2,5W/m ² K)
S1	3,675	Reprovado	Reprovado
S2	0,297	Aprovado	Aprovado
S3	1,361	Aprovado	Aprovado
S4	1,027	Aprovado	Aprovado

Fonte: autores.

O sistema S1 não atende ao requisito de nenhuma das normas citadas, pois apresentou transmitância térmica de 3,675W/m²K, mostrando-se como um sistema de vedação com baixo desempenho neste quesito. Os demais sistemas, compostos por maior número de camadas, apresentaram valores de transmitância térmica acima dos valores mínimos recomendados por ambas as normas. Dentre eles, o sistema com melhor desempenho térmico para a ZB2 foi o S2, por ser composto por múltiplas camadas de materiais de menor condutividade térmica como a madeira, manta mineral e o painel OSB, que contribuíram para o resultado. A adoção deste sistema em edificações pode contribuir para a redução do consumo energético com condicionamento artificial, visto que o ambiente interno é menos afetado pelas variações de temperatura externas. O isolamento proporcionado pela vedação reduz as trocas térmicas entre interior e exterior, reduzindo as perdas de calor de dentro para fora durante o inverno e reduzindo ganhos de calor vindos do ambiente externo no verão. Ao adicionar isolamento térmico de pelo menos 5cm de espessura em sistemas de vedação, é possível reduzir as perdas de calor de uma edificação entre 80% a 90% (IBRAHIM, 2014).

3.2 TEOR DE UMIDADE TOTAL

A Tabela 5 apresenta os valores de teor de umidade total (TUT) inicial, final, máximo e mínimo dos quatro sistemas, e indica o desempenho dos sistemas para este critério. São aprovados os sistemas que diminuem o TUT e reprovados aqueles que aumentam o TUT ao final do período de simulação para as condições de entorno consideradas neste estudo.

Tabela 5 – Teor de umidade total dos sistemas analisados

Sistema	Teor de Umidade Total (kg/m ²)				Desempenho
	Inicial	Final	Mínimo	Máximo	
S1	0,57	0,53	0,29	0,69	Aprovado
S2	1,61	1,35	1,23	1,61	Aprovado

S3	2,58	1,76	1,64	2,58	Aprovado
S4	3,23	2,08	2,06	3,23	Aprovado

Fonte: autores.

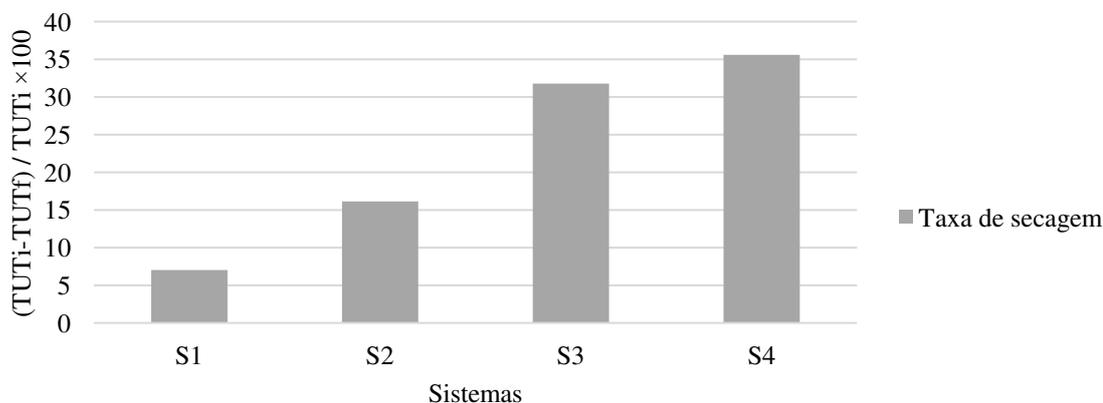
Todos os sistemas foram aprovados para o critério do teor de umidade total, pois todos apresentaram redução do TUT ao final do período de simulação. Em relação à variação entre o máximo e mínimo teor de umidade total observado nos sistemas, ao longo do período de simulação, o sistema S2 se apresentou mais constante, sofrendo uma variação de apenas 30,89% entre o TUT máximo (1,61kg/m²) e o mínimo (1,23kg/m²). Este resultado é positivo pois mostra que o sistema de vedação não fica exposto a variações extremas de umidade, que contribui para prolongar a vida útil do sistema. Em seguida, o S3 apresentou variação de 57,32%, seguido pelo S4 que apresentou variação de 56,80%. O S1 apresentou a maior variação de teor de umidade, entre 0,29kg/m² e 0,69kg/m², equivalente a 137,93% de variação. que pode acelerar a deterioração dos materiais, reduzindo a vida útil do sistema de vedação.

3.3 TAXA DE SECAGEM

A taxa de secagem para os quatro sistemas é apresentada na Figura 2, mostrando a porcentagem de umidade que os sistemas perderam ao longo do período de simulação. Os sistemas de alvenaria, S3 e S4, apresentaram maior taxa de secagem, respectivamente 31,78% e 35,60%, com redução da TUT de 2,58 kg/m² para 1,76 kg/m² no S3 e de 3,23 kg/m² para 2,08 kg/m² no S4. Nota-se que o aumento da espessura do sistema de alvenaria de 10 para 15cm, mudando a orientação do assentamento do tijolo, resultou em um aumento de 3,82% da taxa de secagem, que pode ser significativo no controle da umidade pelo sistema de vedação.

Os sistemas de madeira S1 e S2 apresentaram taxa de secagem menor. O sistema S2 apresentou taxa de secagem de 16,15% (TUT de 1,61 para 1,35kg/m²), e S1 apresentou taxa de secagem de 7,02% (TUT de 0,57 para 0,53kg/m²). É possível observar que a adição de camadas e a inclusão de isolante térmico no sistema contribuíram, neste caso, para o aumento da taxa de secagem em 9,13% entre a parede simples de madeira do S1 e a parede composta do S2.

Figura 2 – Taxa de secagem dos sistemas de vedação



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

3.3 TEOR DE UMIDADE POR CAMADA

A Tabela 6 apresenta os valores de teor de umidade total de cada camada dos sistemas analisados no estudo. Todas as camadas de todos os sistemas apresentaram redução do teor de umidade ao final do período de simulação, o que mostra que, de modo geral, em um longo período, nenhuma das camadas dos sistemas acumula umidade. As camadas externas, de todos os sistemas, apresentaram a menor redução do teor de umidade e o maior teor de umidade final, possivelmente devido à posição da camada, que fica diretamente exposta à incidência de chuva. Para o sistema S2, a camada de madeira externa teve apenas 8,40% de taxa de secagem enquanto as demais camadas apresentaram 27,13% (camada de ar), 8,70% (manta mineral) e 20,67% (painel OSB). Para os sistemas S3 e S4, a taxa de secagem da argamassa externa foi de 11,89% e 15,20%, respectivamente, enquanto as taxas de secagem das demais camadas foram de 45,00% e 45,85% (tijolo cerâmico) e 24,75% e 25,06% (argamassa interna).

Tabela 6 – Teor de umidade total dos sistemas analisados

Sistema	Camada	Teor de Umidade por Camada (kg/m ³)				Desempenho
		Inicial	Final	Mínimo	Máximo	
S1	Madeira macia (conífera)	60,00	55,9	30,29	73,11	Aprovado
	Madeira macia (conífera)	60,00	54,96	39,82	67,77	Aprovado
S2	Camada de ar (5 cm)	1,88	1,37	0,7	2,33	Aprovado
	Manta mineral (ISOVER)	0,46	0,42	0,37	0,48	Aprovado
	Painel OSB	95,00	75,36	70,92	95,00	Aprovado
S3	Argamassa de cimento cal, fina	25,66	22,61	18,83	56,17	Aprovado
	Tijolo cerâmico	13,00	7,15	6,61	13,02	Aprovado
	Argamassa de cimento cal, fina	25,66	19,31	18,75	25,66	Aprovado
S4	Argamassa de cimento cal, fina	25,66	21,76	20,45	31,15	Aprovado
	Tijolo cerâmico	13,00	7,04	7,04	13,00	Aprovado
	Argamassa de cimento cal, fina	25,66	19,23	18,66	25,66	Aprovado

Fonte: autores.

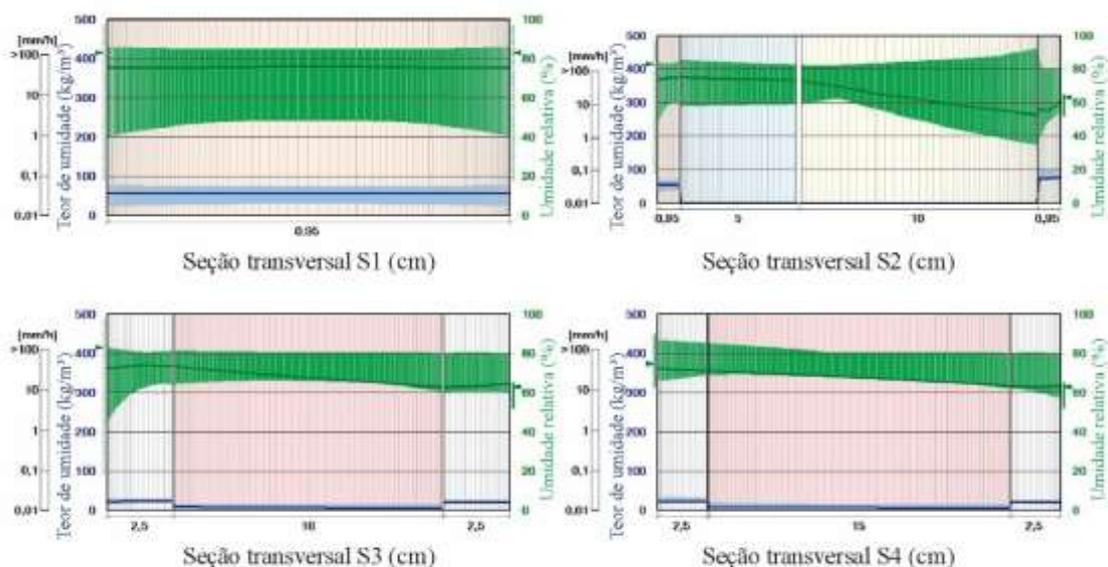
A camada interna que apresentou maior taxa de secagem foi a argamassa interna do sistema S4, com 25,06%, seguida pelo S3 com 24,75% e pelo S2, com 20,67% para o painel OSB. A camada interna que ficou mais protegida em relação à variação do teor de umidade foi o painel OSB, que apresentou variação de 33% entre o teor de umidade máximo e mínimo ao longo do período de simulação, seguido pela argamassa interna dos sistemas S3 (36,85%) e S4 (37,51%). Observa-se que há pouca diferença em relação ao teor de umidade e proteção das camadas internas dos sistemas S2, S3 e S4.

Os valores máximos de teor de umidade mostraram que as camadas externas de todos os sistemas apresentaram, em algum momento do período avaliado, teor de umidade maior que o inicial. A camada externa do S4 chegou a um teor de umidade máximo 21,40% maior que o teor de umidade inicial. A camada externa do S2 atingiu um teor de umidade máximo 12,95% maior que o teor de umidade inicial da camada. Esta situação pode indicar um maior risco de deterioração nestas camadas.

3.4 RISCO DE CONDENSAÇÃO DE VAPOR

A Figura 3 apresenta os valores de umidade relativa (representados pela linha verde) e de teor de umidade (representados pela linha azul) observados na seção transversal dos sistemas ao final do período de simulação, além dos valores máximos e mínimos de umidade relativa (representados pela mancha verde) e de teor de umidade (representado pela mancha azul) dos quatro sistemas construtivos ao longo do período de simulação.

Figura 3 – Teor de umidade e umidade relativa na seção transversal dos sistemas.



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

Os sistemas mantiveram a umidade relativa máxima abaixo de 90%, com valores menores à medida que se aproxima da face voltada para o interior da edificação. O sistema S1 apresentou umidade relativa e teor de umidade constante ao longo de toda a seção transversal. No entanto, o sistema apresentou elevada variação de umidade relativa e teor de umidade durante o período de simulação, como pode ser observado pelas manchas azul e verde, respectivamente. Além disso, a umidade relativa máxima esteve acima de 80% em toda a seção transversal, o que pode indicar risco de condensação no sistema de vedação.

O sistema S2 apresentou a área de umidade relativa e teor de umidade menores que o sistema anterior, mantendo as máximas de umidade relativa levemente acima de 80%, apresentando um pico na interface entre o isolante térmico e o painel OSB interno. Este é o ponto com maior risco de condensação no sistema S2, e o ponto com maior umidade relativa entre todos os sistemas. Devido à presença do isolante térmico na face mais interna da parede, a temperatura da parede diminuiu, levando à redução da capacidade de secagem da parede e a um maior teor de umidade nesta interface. Quando há o uso de isolante térmico junto à face interna do sistema de vedação, é aconselhável incluir o uso de barreiras de vapor (IBRAHIM et al., 2014). Os sistemas de alvenaria, S3 e S4, apresentaram a menor mancha de umidade relativa e de teor de umidade, apresentando poucos pontos levemente acima de 80%, próximos à área externa, por ser a região de maior exposição à chuva incidente e às variações climáticas.

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho avaliou o desempenho higrotérmico de quatro sistemas de vedação vertical em madeira e tijolo cerâmico para a Zona Bioclimática 2. O comportamento dos sistemas frente a trocas de calor e umidade foi simulado utilizando a ferramenta WUFI, considerando a orientação solar sul, situação mais crítica devido ao elevado nível de chuva dirigida e à baixa incidência de radiação solar. Os sistemas foram avaliados em relação à transmitância térmica, teor de umidade total, taxa de secagem, teor de umidade por camada e risco de condensação de vapor.

Quanto ao desempenho térmico, os resultados mostram que apenas o sistema S1 não foi aprovado de acordo com a NBR 15220 e a NBR 15575, sendo o sistema S2 o que apresentou o melhor desempenho térmico, dos quatro sistemas analisados. Quanto ao teor de umidade total, todos apresentam desempenho satisfatório, havendo redução do teor de umidade ao longo do tempo. O maior risco de condensação encontrado foi na interface entre o isolante térmico e o painel de OSB interno do sistema de madeira (S2), típico deste tipo de vedação com isolante térmico próximo ao interior da edificação vedação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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, 2005.

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

BRASIL. **Pretendida contribuição nacionalmente determinada para consecução do objetivo da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. [anúncio feito pela Presidenta da República em discurso na Cúpula de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas]. Nova York, 2015. Disponível em: http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/BRASIL-iNDC-portugues.pdf. Acesso em: 20 ago. 2019.

BUSSER, T.; BERGER, J.; PIOT, A; PAILHA, M.; WOLOSZYN, M. Comparison of model numerical predictions of heat and moisture transfer in porous media with experimental observations at material and wall scales: An analysis of recent trends. **Drying Technology**, v. 37, n. 11, p. 1363-1395, 2019.

DELGADO, J. M. P. Q.; RAMOS, N. M. M.; BARREIRA, E.; FREITAS, V. P. A critical review of hygrothermal models used in porous building materials. **Journal of Porous Media**, v. 13, n. 3, p. 221-234, 2010.

IBRAHIM, M.; WURTZ, W.; BIWOLE, P. H.; ACHARD, P.; SALLEE, H. Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering. **Energy and Buildings**, v. 84, p. 241-251, 2014.

IEA – International Energy Agency; IRENA – International Renewable Energy Agency; UNSD – United Nations Statistics Division; WB – World Bank Group; WHO – World Health Organization, **Tracking SDG7: The Energy Progress Report 2018**. Washington DC: WB, 2018.

IEA – International Energy Agency. **Key world energy statistics**. Paris: IEA, 2018.

JERNBERG, P.; LACASSE, M. A.; HAAGENRUD, S.E.; SJÖSTRÖM, C. **Guide and bibliography to service life and durability research for building materials and components**. Rotterdam: International Council for Building Research, Studies and Documentation, 2004. (CIB Publication, v. 295).

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

NASCIMENTO, M.; PEREIRA, J. G.; ALVES, G. L.; SANTOS FILHO, V.; DANTAS, A. A. N. Hygrothermal simulation: use for service life prediction and maintenance of façades. **WIT Transactions on The Built Environment**, v. 183, p. 139-149, 2019.

KRONKA, R. C.; DEL CARLO, U. *Eucaliptus grandis* – sustainable solution for the Brazilian building sector. *In: PLEA – Passive and Low Energy Architecture*, 18., Florianópolis, **Anais [...]**. Florianópolis: UFSC, 2001. p. 415-420.

PARK, J. H.; KANG, Y.; LEE, J.; CHANG, S. J.; WI, S.; KIM, S. Development of wood-lime boards as building materials improving thermal and moisture performance based on hygrothermal behaviour evaluation. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 576-585, 2019.

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