XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

ANÁLISE HIGROTÉRMICA DE DIFERENTES TIPOS DE VEDAÇÕES VERTICAIS DE MADEIRA PARA A ZONA BIOCLIMÁTICA BRASILEIRA 2

Gabriela Meller (1); Mainara Ridiani Palcikoski (2); Bruna Zambonato (3); Elaise Gabriel (4); Liliane Bonadiman Buligon (5); Giane de Campos Grigoletti (6)

(1) Msc Engenharia Civil, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, gabrielameller0@gmail.com

(2) Estudante do curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, mainararidiani@hotmail.com

(3) Arquiteta e Urbanista, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, Universidade Federal de Santa Maria, bruzambo@hotmail.com

(4) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, elaisegabriel@gmail.com

(5) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, libbonadimam@gmail.com

(6) 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

RESUMO

A utilização da madeira na construção civil pode apresentar características favoráveis às práticas de sustentabilidade em edificações. O Brasil é um país que tem grande produção de árvores plantadas, diante disso são necessários estudos que investiguem e incentivem a utilização da madeira na construção civil. O objetivo deste trabalho foi analisar diferentes sistemas de vedação vertical quanto ao fluxo de umidade (por transporte capilar e de vapor) e quanto ao desempenho térmico para a Zona Bioclimática 2. A metodologia foi dividida em três etapas, na primeira foram definidos 6 sistemas construtivos de fachadas de madeira, sendo eles: S1 lambril; S2 lambril, camada de ar e chapa OSB; S3 lambril, lã mineral e chapa OSB; S4 lambril, lã mineral, camada de ar e chapa OSB; S5 lambril, camada de ar, lã mineral e chapa OSB e S6 lambril, manta hidrofóbica, camada de ar, lã mineral e manta OSB. A segunda etapa consistiu na caracterização dos parâmetros do programa e, na última etapa, foram realizadas as simulações no programa WUFI®. Quanto ao desempenho térmico apenas o sistema S1 foi reprovado, de acordo com as ABNT NBR 15220 e NBR 15575. Quanto ao fluxo do transporte de vapor e umidade total, todos os sistemas indicaram resultados positivos. Observou-se que não houve interferência da posição da lã mineral quanto ao fluxo, teor de umidade, taxa de secura, transporte capilar e transporte de vapor.

Palavras-chave: madeira, fluxo de umidade, desempenho térmico.

ABSTRACT

The use of wood in civil construction can present favorable characteristics to the sustainability practices in buildings. Brazil is a country that has a large production of trees, thus studies are needed to investigate and encourage the use of wood in construction. The objective of this work was to analyze different constructive systems regarding the moisture transfer (by capillary and steam transport) and thermal performance. The methodology was divided in three steps, in step one were 6 constructive systems of wood facades were defined: S1 lamell wood; S2 lamell, air layer and OSB; S3 lamell, mineral wool and OSB; S4 lamell, mineral wool, air layer and OSB; S5 lamell, air layer, mineral wool and OSB and S6 lamell, hydrophobic sheath, air layer, mineral wool and OSB. The second step consisted in the program parameters and, in the last step the simulations were performed in the WUFI® software. As for the thermal performance only the system 1 was rejected, according to ABNT NBR 15220 and NBR 15575. As for steam transport flow and total humidity, all systems indicated positive results. It was observed that there was no interference of the mineral wool position with respect to flow, moisture content, dryness rate, capillary transport and vapor transport.

Keywords: Wood, moisture transfer, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a construção civil e principalmente as pesquisas nesta área têm voltado sua atenção para a sustentabilidade das edificações. Isso inclui a avaliação dos materiais e técnicas construtivas utilizadas para maior controle de temperatura e umidade tanto na envoltória quanto no ambiente interno. Este controle proporciona salubridade e qualidade do ambiente interno com maior durabilidade e baixa manutenção. A avaliação do comportamento higrotérmico de edificações permite identificar o comportamento da envoltória frente a condições climáticas e seus efeitos no ambiente interno e na durabilidade e necessidade de manutenção do sistema construtivo analisado (JORNE, 2010).

A presença de umidade na construção é um dos principais responsáveis pelo desconforto dos usuários bem como pela degradação acentuada dos elementos construtivos. O desenvolvimento de fungos é um dos indicadores da elevada umidade relativa no interior das edificações (RAMOS, 2007). A água também pode ter outros efeitos diretos, como a deterioração por congelamento e a perda de ligação entre camadas devido à condensação do vapor de água na interface entre camadas construtivas e efeitos indiretos como ataques químicos a pedras naturais, corrosão de elementos de concreto, entre outros (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007). Sendo assim, é de suma importância a análise do comportamento higrotérmico dos materiais e sistemas construtivos adotados nas construções frente às condições climáticas a que estão expostos, de modo a prever sua durabilidade e a qualidade do ambiente interno das edificações.

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.

O presente trabalho apresenta um estudo do desempenho higrotérmico de paredes externas em madeira para a Zona Bioclimática 2 (ABNT, 2005b). Foram avaliados seis sistemas construtivos, partindo de um sistema mais simples, comumente utilizado em edificações de madeira na região, a partir do qual foram adicionadas novas camadas de modo a melhorar seu desempenho

2. OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de analisar seis diferentes sistemas de vedação vertical em madeira quanto ao desempenho térmico, e quanto ao fluxo de umidade, por transporte capilar e vapor, para a Zona Bioclimática Brasileira 2 (ZB2).

3. MÉTODO

O procedimento metodológico desta pesquisa se dá por meio de simulação computacional para identificação dos fluxos de umidade e desempenho térmico em uma edificação localizada no município de Chuí/RS. A partir de simulação computacional com a utilização do programa *WUFI® Light Pro* (versão 6.3), a metodologia seguiu três etapas: (I) definição dos sistemas construtivos de fachadas de madeira, (II) caracterização dos parâmetros do programa, (III) simulação e análise dos resultados.

Um dos entraves encontrados para o desenvolvimento deste estudo foi a constatação de que a versão utilizada do programa não permite a inserção de novos arquivos climáticos e apresenta dados apenas para duas cidades da América do Sul, Santiago (Chile) e Buenos Aires (Argentina). Dessa forma, buscou-se compatibilizar uma das cidades com um município localizado no Rio Grande do Sul, inserido na Zona Bioclimática 2, e que apresentasse características climáticas semelhantes às fornecidas pelo programa.

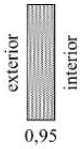
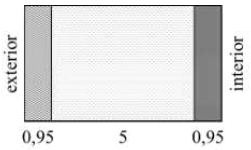
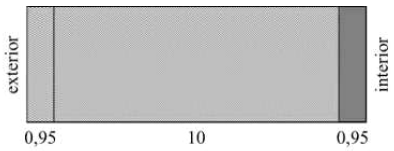
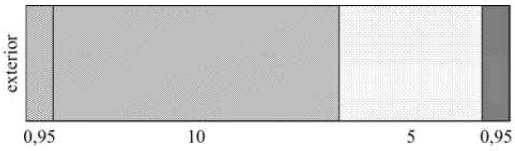
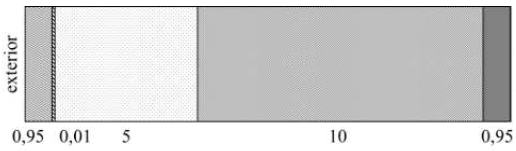
Desse modo, a cidade definida para estudo foi Chuí (RS), localizada na latitude de 33º41', longitude de 53º27' e altitude 22m, convencionando-se a adotar os dados de referência de Buenos Aires, que está localizada na latitude de 34º55', longitude de 58º57' e altitude de 26 m.

3.1. Determinação dos sistemas construtivos

Foram propostos seis modelos de fechamentos verticais de madeira. O primeiro modelo consistiu em um sistema convencional brasileiro (lambril de madeira serrada do tipo madeira mole). Para os demais sistemas

de fechamento, foram verificadas composições com maior número de camadas, de melhor desempenho em relação a valores de transmitância térmica, calculados conforme a NBR 15220-2 (ABNT, 2005a). A Tabela 1 apresenta a descrição dos sistemas construtivos estudados, cujas representações foram obtidas do programa.

Tabela 1 – Descrição dos sistemas construtivos adotados.

Sistemas	Representação do sistema construtivo	Descrição (de fora para dentro)	Transmitância térmica (W/m²K)
S1		0,95 cm de lambril: madeira do tipo conífera (madeira mole)	3,675
S2		0,95 cm de lambril (madeira mole) + 5 cm de ar + 0,95 cm de chapa OSB	1,962
S3		0,95 cm de lambril (madeira mole) + 10 cm de lã mineral (*Isover Ultimate Klemmfilz*) + 0,95 cm de chapa OSB	0,314
S4		0,95 cm de lambril (madeira mole) + 10 cm de lã mineral (*Isover Ultimate Klemmfilz*) + 5 cm de ar + 0,95 cm de chapa OSB	0,297
S5		0,95 cm de lambril (madeira mole) + 5 cm de ar + 10 cm de lã mineral (*Isover Ultimate Klemmfilz*) + 0,95 cm de chapa OSB	0,297
S6		0,95 cm de lambril (madeira mole) + 1 cm de manta hidrofóbica (*Aspen Aerogels Spaceloft*) + 5 cm de ar + 10 cm de lã mineral (*Isover Ultimate Klemmfilz*) + 0,95 cm de chapa OSB	0,248

As características de cada material utilizado estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais construtivos utilizados.

Propriedade	Madeira macia (conífera)	Manta hidrofóbica (*Spaceloft*)	Camada de ar (5 cm)	Manta mineral (*ISOVER*)	Painel OSB
Densidade aparente [kg/m³]	400	146	1,3	25,2	595
Porosidade [m³/m³]	0,73	0,92	0,999	0,95	0,9
Calor específico [J/(kg.K)]	1400	1000	1000	1000	1400
Condutibilidade térmica [W/(m.K)]	0,09	0,014	0,28	0,035	0,13
Fator de resistência à difusão de vapor de água	200	4,7	0,32	1	165

3.2. Calibração dos modelos

Para a calibração dos modelos analisados foram definidos os seguintes parâmetros no programa: orientação solar ao norte; edifício pequeno com altura de até 10 m; paredes externas com pintura do tipo acrílica;

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.

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.

A edificação foi determinada como plana, composta de dois dormitórios, taxa de renovação horária 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).

Similar aos arquivos climáticos externos, a versão utilizada do programa não permite a alteração dos dados de clima interno. Portanto, foram utilizados os dados para Buenos Aires (Argentina), representativos do clima de Chuí (RS). O clima interno ficou definido, então, com temperatura média de 17,7ºC; temperatura máxima de 36,8ºC; temperatura mínima de 0,8ºC; umidade relativa média de 70,1%; umidade relativa máxima de 100%; umidade relativa mínima de 22%; velocidade do vento média de 2,6 m/s e somatória da precipitação normal de 1544,4 mm/a.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste estudo foram verificados os parâmetros quanto ao desempenho térmico para a Zona Bioclimática 2 na qual está inserida a cidade do Chuí/RS, 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® Light Pro* parte de um método iterativo para a solução das equações de transportes higrotérmicos. 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 atendessem aos critérios de encerramento do sistema, fazendo com que haja um número de falhas.

4.1. Análise quanto ao desempenho térmico

A verificação quanto ao desempenho térmico de cada vedação vertical foi efetuada segundo os critérios das normas de desempenho térmico de edificações NBR 15220-3 que estipula que, para paredes leves, a transmitância térmica (U) deve ser menor ou igual a 3,0 W/m²K, e NBR 15575-4 que estipula que o mínimo desempenho necessário deve ser 2,5 W/m²K (ABNT, 2005b; ABNT, 2013). A Tabela 3 apresenta os valores de transmitância térmica das vedações verticais e seus respectivos desempenhos.

Tabela 3- Desempenho térmico das vedações verticais.

Sistema construtivo	Transmitância térmica [W/m²K]	Desempenho térmico (NBR 15220-3)	Desempenho térmico (NBR 15575-4)
S1	3,675	Reprovado	Reprovado
S2	1,962	Aprovado	Aprovado
S3	0,314	Aprovado	Aprovado
S4	0,297	Aprovado	Aprovado
S5	0,297	Aprovado	Aprovado
S6	0,248	Aprovado	Aprovado

É possível verificar que o sistema construtivo S1, composto por 9,5 cm de lambril, não passou quanto aos requisitos mínimos das normas de desempenho, contudo, todos os demais sistemas foram aprovados, sendo que o sistema S6 apresentou o valor de transmitância térmica mais favorável (0,248 W/m²K). Analisou-se também, que o emprego de 10 cm de lã mineral com baixo valor de transmitância térmica junto de 5 cm de camada de ar, como o sistema construtivo S4, melhorou em 1,665 W/m²k a transmitância térmica quando comparado ao sistema construtivo S2 (lambril + 5 cm de ar + chapa OSB).

4.2. 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.

A Tabela 4 apresenta os resultados da integração de fluxos por transporte capilar (kl) e transporte de vapor (dl), obtidos por meio de simulações para cada sistema de integração e do seu respectivo balanço de umidade.

Tabela 4- Integração de fluxos por transporte capilar e transporte de vapor.

Sistema construtivo	Transporte capilar do lado esquerdo (kl) [kg/m²]	Transporte capilar do lado direito (kr) [kg/m²]	Transporte de vapor do lado esquerdo (dl) [kg/m²]	Transporte de vapor do lado direito (dr) [kg/m²]
S1	0,0	0,0	-1,09	-0,94
S2	0,0	-0,49	-2,12	-1,35
S3	0,0	-0,55	-3,07	-2,17
S4	0,0	-0,35	-2,04	-1,42
S5	0,0	-0,35	-2,04	-1,42
S6	0,0	-0,34	-2,00	-1,38

Observa-se que o sistema construtivo S1, composto de madeira mole, apresentou excelente desempenho quanto ao transporte capilar, constatando-se que não houve transporte capilar durante o seu tempo de análise de 2 anos. Contudo, o sistema S3 (madeira mole + lã mineral + chapa OSB) indicou ser o sistema mais suscetível ao transporte capilar, porém, quando há transporte capilar o seu fluxo é direcionado para fora da edificação.

Na análise quanto ao fluxo do transporte de vapor, todos os sistemas o transportaram para fora do ambiente, sendo o sistema S1 o que apresentou menores teores em virtude de a madeira mole ser a que menos retém vapor em seu material. Já o modelo S3 foi o que apresentou o maior teor de vapor incorporado no sistema, ainda assim, seu fluxo negativo indica que seu transporte irá ocorrer em direção ao lado externo.

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. A tabela 5 mostra que, os seis sistemas construtivos analisados, o Balanço 1 foi igual ao Balanço 2, todos com sentido de fluxo indo do ambiente interno para o externo.

Tabela 5- Balanço entre a integração de fluxos do lado esquerdo e direito.

Sistema construtivo	Balanço 1 [kg/m²]	Balanço 2 [kg/m²]
S1	-0,15	-0,15
S2	-0,28	-0,28
S3	-0,35	-0,35
S4	-0,28	-0,28
S5	-0,28	-0,28
S6	-0,28	-0,28

4.3. 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 espessura (m) do sistema construtivo. 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.

A Tabela 6 apresenta o teor de umidade total inicial e final dos seis sistemas construtivos analisados. Todos os sistemas construtivos foram aprovados neste critério, apresentando teor de umidade total final menor que o teor de umidade total inicial. Observa-se que os sistemas que continham mais camadas em sua composição foram os que apresentaram os maiores teores de umidade total no sistema.

Tabela 6 - Teor de umidade total.

Sistema construtivo	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**	**S5**	**S6**
TUT inicial [kg/m²]	0,57	1,47	1,52	1,52	1,52	1,59
TUT final [kg/m²]	0,42	1,19	1,16	1,24	1,24	1,29

4.3.1. Taxa de secura (dryness rate – DR)

Após a verificação de que o teor de umidade de todos os sistemas construtivos diminuiu ao longo do tempo, foi calculada a porcentagem de perda de umidade durante o período de dois anos de simulação. Esta porcentagem indica a diferença entre o teor de umidade final e inicial dos sistemas construtivos. Para isso, é aplicada a Equação 1, que expressa que quanto maior a taxa de secura, maior a capacidade da parede de perder umidade rapidamente com o passar do tempo (GIARMA; BIKAS; ARAVANTINOS, 2007).

$(TUT_i - TUT_f)/TUT_i \times 100$ Equação 1

Onde:

TUTi é o teor de umidade total inicial [kg/m²];
TUTf é o teor de umidade total final [kg/m²];

A Tabela 7 apresenta a taxa de secura dos seis sistemas construtivos analisados. Os sistemas construtivos com maior quantidade de componentes, sistemas S4, S5 e S6, apresentaram menores taxas de secura se comparado ao sistema construtivo S1, caracterizando-se como sistemas com maior teor de umidade. Percebe-se também que a presença da manta hidrofóbica do sistema construtivo S6 pode ter colaborado para que este apresentasse uma taxa de secura maior que os sistemas S4 e S5, que são similares ao sistema S6, porém sem a manta hidrofóbica.

Tabela 7 – Taxa de secura.

Sistema construtivo	S1	S2	S3	S4	S5	S6
DR [%]	26,32	19,05	23,68	18,42	18,42	18,87

4.3.2. Teor de umidade por camadas

Ao analisar o teor de umidade por camadas (Tabela 8), é possível identificar a eficiência dos materiais quanto à proteção, à umidade e, consequentemente, quanto à proliferação de fungos e retenção de umidade. Verificou-se que a inclusão de materiais, como de isolamento térmico e manta hidrofóbica, auxiliaram de diferentes formas na redução do teor de umidade do fechamento interno (painel OSB).

Já o teor de umidade do isolante térmico, nos diferentes sistemas construtivos, diminuiu quando sua posição foi mais próxima ao lado esquerdo (interior da edificação), em virtude de que nesta situação o componente está menos exposto às intempéries do ambiente externo.

Observou-se que a aplicação da manta hidrofóbica foi praticamente irrisória na contenção de umidade no sistema final (painel OSB), apresentando diferença de 0,05 kg/m³ quando comparado ao sistema S4 (sem a manta). Nesta análise, a aplicação da lã mineral apresentou maior eficiência na contenção da umidade, apresentando diferença de 2,85 kg/m² na análise final quando comparado ao sistema S2 (sem lã mineral).

Dentre os materiais de madeira empregados foi verificado que o painel OSB apresenta o maior teor de umidade final na camada, contudo há a hipótese de que esse valor pode ser reduzido ao se aplicar tinta, como foi o caso da madeira mole.

Tabela 8 – Teor de umidade por camada.

Sistema construtivo	Camada	Início [kg/m³]	Fim[kg/m³]	Mínimo [kg/m³]	Máximo [kg/m³]
S1	Madeira mole (conífera)	60,00	44,61	30,82	88,85
S2	Madeira mole (conífera)	60,00	46,09	38,81	61,06
	Camada de ar (5 cm)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Painel OSB	95,00	79,09	76,04	95,00
S3	Madeira mole (conífera)	60,00	41,49	32,14	60,00
	Lã mineral (*Isover*)	0,46	0,41	0,39	0,46
	Painel OSB	95,00	76,24	74,66	95,00
S4	Madeira mole (conífera)	60,00	50,34	35,55	67,90
	Lã mineral (*Isover*)	0,46	0,42	0,38	0,46
	Camada de ar (5 cm)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Painel OSB	95,00	75,32	69,88	95,00
S5	Madeira mole (conífera)	60,00	50,33	35,54	67,89
	Camada de ar (5 cm)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Lã mineral (*Isover*)	0,46	0,41	0,38	0,46
	Painel OSB	95,00	75,32	69,89	95,00
S6	Madeira mole (conífera)	60,00	50,50	35,70	67,73
	Manta hidrofóbica (*Spaceloft*)	6,60	5,66	4,84	7,55
	Camada de ar (5 cm)	0,01	0,01	0,01	0,01
	Lã mineral (*Isover*)	0,46	0,41	0,37	0,46
	Painel OSB	95,00	75,27	69,92	95,00

4.3.3. 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 realizarmos uma comparação entre a temperatura da superfície (TS) e a temperatura do ponto de orvalho (TO). O risco de condensação é verificado no momento que 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 de 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).

Realizadas as simulações, a Figura 2 apresenta os valores relativos à umidade relativa e o teor de umidade dos respectivos sistemas analisados. 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 o teor de umidade e a umidade relativa atingidos em cada posição dos sistemas construtivos ao longo do período de simulação.

No sistema S1, a posição com maior risco de condensação é a superfície interna, que apresentou valores de umidade relativa acima de 80%. Para o sistema S2, as posições com maior risco de condensação são a superfície externa e a superfície entre o lambril e a camada de ar, que apresentaram umidade relativa levemente acima de 80% em alguns momentos ao longo dos dois anos de simulação. Para o sistema S3 também houveram alguns momentos ao longo da simulação que apresentaram umidade relativa levemente acima de 80% na superfície entre o lambril e a lã mineral. No sistema S4, houve momentos em que a umidade relativa ficou próxima a 90% em alguns momentos da simulação na superfície externa e na superfície entre o lambril e a lã mineral, indicando maior risco de condensação nestes locais. Para o sistema S5 a umidade relativa também atingiu quase 90% em alguns momentos ao longo da simulação para a superfície externa e entre a superfície do lambril, a camada de ar e a superfície da lã mineral. Por fim, para o sistema S6, há grande risco de ocorrência de condensação na superfície entre o lambril e a lã mineral, visto que nesta posição a umidade relativa final foi maior que 80%.

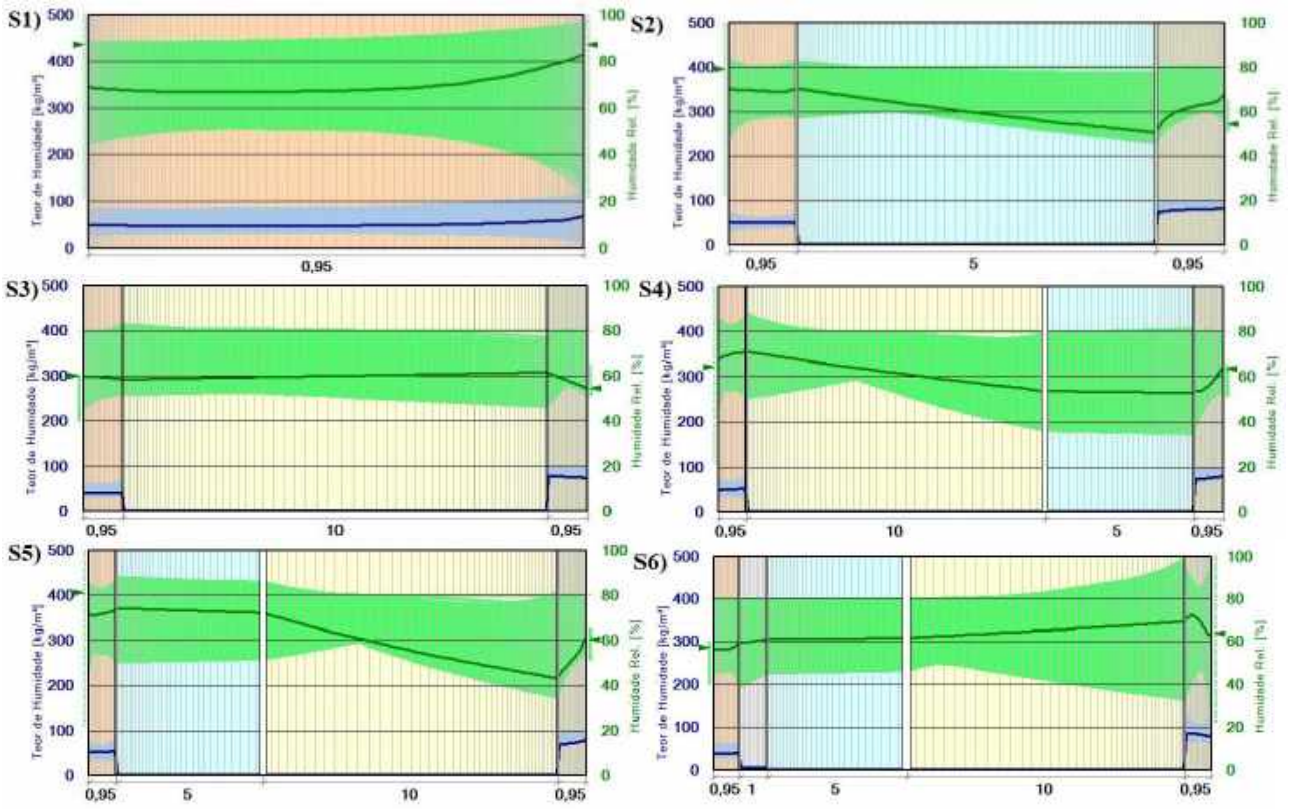


Figura 2 – Teor de umidade [kg/m³] e umidade relativa [%]

Após a simulação, os sistemas S4, S5 e S6 apresentaram risco de condensação, com umidade relativa acima de 80% nas camadas na superfície entre o lambril e a camada adjacente interna em alguns momentos ao longo da simulação. A superfície entre o lambril e a lã mineral do sistema S6 apresentou maior risco de condensação se comparado a todas as posições dos demais sistemas. Nesta posição, a umidade relativa final foi maior que 80%, e apresentou valores próximos a 90% em alguns momentos ao longo da simulação.

Todos os sistemas apresentaram umidade relativa acima de 80% em alguma posição do sistema 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% para cada sistema, para que se possa identificar aquele com maior ou menor risco de ocorrência de condensação entre os sistemas construtivos.

4.4. Integração dos fluxos relativos ao tempo de 2 anos

No que tange ao fluxo de calor, o programa analisa 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, todos os sistemas dispuseram o fluxo de calor para fora da edificação com exceção do sistema composto apenas por madeira mole (Tabela 9). Porém, foi verificado que este sistema apresentou o melhor desempenho quanto ao fluxo de umidade relativo ao tempo e quanto ao transporte capilar (vide Tabela 4), contudo também apresentou alta probabilidade de ocorrência de condensação.

Diante da análise quanto ao fluxo de umidade, verificou-se que os sistemas S1 e S6 apresentaram os melhores resultados. Destaca-se que o sistema S6 apresentou o menor valor se comparado aos sistemas que continham lã mineral, camada de ar e chapa OSB, em virtude de conter a manta hidrofóbica.

Quanto à verificação da influência do posicionamento da lã mineral do lado esquerdo ou direito do interior do sistema construtivo, observou-se que não houve interferência significativa quanto ao fluxo e ao teor de umidade, contudo, o sistema S5 (com lã mineral tangente à chapa OSB) apresentou melhor resultado quanto ao fluxo de calor.

Tabela 9- Integração de fluxos de calor e umidade relativamente ao tempo.

Sistema construtivo	Fluxo de calor do lado esquerdo [MJ/m²]	Fluxo de calor do lado direito [MJ/m²]	Fluxo de umidade do lado esquerdo [kg/m²]	Fluxo de umidade do lado direito [kg/m²]
S1	0,46	0,07	-1,09	-0,94
S2	-682,05	-682,84	-2,12	-1,84
S3	-46,86	-47,83	-3,08	-2,72
S4	-106,95	-107,84	-2,05	-1,76
S5	-107,21	-108,1	-2,05	-1,76
S6	-89,03	-89,93	-2,00	-1,71

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível verificar a importância de estudar com cuidado os sistemas construtivos 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, dos sistemas analisados, apenas o sistema construtivo S1 foi reprovado, de acordo com as NBR 15220 e NBR 15575, sendo o sistema S6 o que apresentou melhor valor de transmitância térmica. Foi possível analisar-se também, que o emprego de lã mineral, com baixo valor de transmitância térmica junto à camada de ar (sistema S5), melhorou consideravelmente a transmitância térmica quando comparado ao sistema construtivo S2.

Quanto ao fluxo do transporte de vapor e umidade total, todos os sistemas indicaram resultados positivos. Quanto ao risco de condensação, todos os sistemas apresentaram umidade relativa acima de 80% em alguma posição do sistema em algum momento ao longo da simulação. O sistema S1 foi o que apresentou maior risco de condensação se comparado a todas as posições dos demais sistemas, seguido do sistema S6, que apresentou maior risco de condensação e alguns momentos ao longo da simulação.

Quanto à verificação da influência do posicionamento da lã mineral do lado esquerdo ou direito do interior do sistema construtivo, observou-se que não houve interferência significativa quanto ao fluxo, teor de umidade, taxa de secura, transporte capilar e transporte de vapor. Houve diferença quanto ao fluxo de calor, sendo o sistema S5 (com lã mineral tangente à chapa OSB) que apresentou melhor resultado, porém tal diferença é irrisória se comparado às outras variáveis (como variação do tipo de material isolante, presença ou não de câmara de ar ou a escolha de um material muito absorvente, como foi o caso dos painéis OSB).

Como continuidade deste trabalho, novas simulações serão realizadas, incluindo a análise o uso de tinta no lado interior à edificação bem como a comparação do desempenho dos sistemas construtivos para diferentes orientações.

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 atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 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, 2005b.

___. **NBR 15575-4:** Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4 - Sistemas de vedações verticais internas e externas. Rio de Janeiro, 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. Disponível em: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/8978. Acesso em 04 maio 2019.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 160:** Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings. Atlanta, 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. Disponível em: http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB11697.pdf. Acesso em: Acesso em 04 maio 2019

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

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 Higrotérmico dos Edifícios**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto. Porto, 2007.

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

ZANONI, V.; SÁNCHEZ, J. M.; BAUER, E. Desafios e contribuições: estudo de degradação das edificações por meio de simulação higrotérmica. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16, 2016. São Paulo. **Anais…** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

AGRADECIMENTOS

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