



DESEMPENHO TÉRMICO DE PAINÉIS DE VEDAÇÃO EM MADEIRA: APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE AVALIAÇÃO

Thalita Giglio (1); Miriam Jerônimo Barbosa (2)

Universidade Estadual de Londrina, fone: (43) 3371-4455

E-mail: (1) thalitag@uel.br (2) mjb@uel.br

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho térmico de painéis de vedação em madeira, a partir de alguns métodos existentes no Brasil. Motivada pelo preconceito a cerca do desempenho térmico das habitações em madeira, a pesquisa se direciona para os fechamentos verticais, os quais eram constituídos por apenas tábuas de 2,2 cm de espessura. Assim, foi feita a avaliação de quatro diferentes composições de painéis de vedação. Suas propriedades térmicas foram calculadas conforme a parte 02 do projeto de norma brasileira de desempenho térmico de edificações (ABNT, 1998). Em seguida, aplicou-se o método do fluxo de calor para superfícies verticais, e o método simplificado definido pelo projeto de norma brasileira de desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos (ABNT, 2002), parte 4. Por fim, foi adotada a ferramenta de simulação COMFIE (PEUPORTIER e SOMMEREUX, 1992), para avaliação dos painéis a partir da resposta térmica global anual de uma habitação. Os resultados demonstram que, apesar dos painéis em madeira não atenderem aos critérios mínimos de desempenho térmico pelo projeto de norma 02:136.01.004 (ABNT, 2002), eles apresentaram, por simulação, desempenho térmico igual ou superior às paredes de tijolos cerâmicos rebocadas, aprovadas pela mesma norma.

ABSTRACT

The purpose of this paper is the thermal performance evaluation of wood panels, based on some methods existents in Brazil. Stimulated by the prejudice existent about timber houses thermal performance, the search has focus to wall systems, which were composed by only a board with 2,2 cm of thickness. Thus, was realized the evaluation of four different wall systems. Their thermal properties were calculated according to the second part of Brazilian Standard draw for thermal performance in buildings (ABNT, 1998). Then, was applied the thermal flux method to vertical surface, and the simplify method defined by Brazilian standard draw for performance in buildings until five floor (ABNT, 2002), IV part. Finally, was adopted the software COMFIE (PEUPORTIER e SOMMEREUX, 1992), to evaluate the panels by the yearly global thermal output of a house. The results show that, although wood panels are below of the lowest parameters of thermal performance by standard draw 02:136.01.004 (ABNT, 2002), they presented, by simulation, thermal performance similar or higher than brick walls, accepted by the same standard.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade do aprimoramento e adequação térmica dos painéis em madeira é um importante campo de estudo, já que muitas habitações em madeira construídas no sul do Brasil na década de 30, 40 e 50 são conhecidas como quentes no verão e frias no inverno. Com o foco de pesquisa para os fechamentos verticais, sabe-se que sua composição restringia-se por apenas tábuas de madeira com 2,2 cm de espessura, com frestas protegidas por mata-juntas. Assim, nesta pesquisa, procurou-se, a partir de quatro novas composições de painéis de vedação em madeira, uma avaliação do desempenho

térmico visando comprovar a viabilidade do seu emprego em habitações de interesse social, para a cidade de Londrina, norte do Paraná.

A justificativa do emprego da madeira de reflorestamento e seu aperfeiçoamento em painéis de vedação quanto ao desempenho térmico, são norteados dentro do contexto de sustentabilidade, já que a madeira de pinus, espécie adotada para avaliação, é um material proveniente de florestas plantadas da região sul do país. Caracteriza-se como fonte renovável, cuja cadeia produtiva compreende um baixo consumo de energia e alta absorção de CO₂. Sua baixa densidade por ser um material bastante poroso favorece a propriedade de ser má condutora de calor, com coeficiente de condutibilidade ($\bar{\epsilon}$) de aproximadamente 0,15 W/(m.K) (CSTB apud UCHOA, 1989; ABNT, 1998). Quanto à propriedade do calor específico (C), a madeira apresenta valor relativamente alto (em torno de 1,34 kJ/kg.K) (ABNT, 1998), sendo necessária uma grande quantidade de calor para elevar sua temperatura.

Atualmente, o sistema construtivo das habitações em madeira mais empregado nos países desenvolvidos é o Wood frame construction (CANADIAN WOOD COUNCIL, 1997), o qual se caracteriza por peças de pequenas dimensões, unidas por pregos. A partir desta técnica, os painéis de vedação passam a apresentar câmaras de ar não ventiladas entre os espaçamentos dos montantes, com fechamento externo e interno em madeira, nomeados assim de painéis duplos. Este tipo de painel com uma câmara de ar, favorece o aumento da resistência térmica do fechamento e contribui para o melhor desempenho térmico da parede.

Para a avaliação do desempenho térmico de fechamentos verticais, Barth e Mendes (1999) sugerem a utilização da equação do fluxo de calor através da temperatura sol-ar ($T_{sol\ ar}$). O fluxo de calor em superfícies verticais varia em função da diferença de temperatura exterior e interior, da intensidade da radiação solar incidente na superfície e da propriedade de absorvância (α) à radiação solar. O fluxo de calor é dado pela equação:

$$q = U \cdot A \cdot (T_{ext} + \alpha \cdot R_s \cdot R_{se} - T_{int}) \quad [\text{Eq. 01}]$$

Sendo q o fluxo de calor que incidirá no ambiente interno (W/m²); U a transmitância térmica (W/(m².K)); A a área da parede a ser avaliada (m²); R_s a radiação total incidente na superfície (W/m²); R_{se} a resistência superficial externa.

Tabela 1: Valores Máximos Admissíveis para a Transmitância Térmica de Paredes Externas

Nível de desempenho	Transmitância Térmica ⁽¹⁾ [U, em W/(m ² .K)]		
	Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
		$\alpha^{(2)} < 0.6$	$\alpha^{(2)} \geq 0.6$
M	$U \leq 2.5$	$U \leq 3.7$	$U \leq 2.5$

(1) Valores de transmitância térmica (U) considerando-se a resistência superficial interna com valor de 0,13 m².K/W e a resistência térmica superficial externa com valor de 0,04 m².K/W;
(2) α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: Projeto 02:136.01.004:2002 (ABNT, 2002)

Tabela 2: Valores Mínimos de Capacidade Térmica para Fachadas e Paredes Internas

Nível de desempenho	Capacidade Térmica [C _T , em kJ/(m ² .K)]	
	Zona 8	Zonas 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7
M	$C_T \geq 45$	$C_T \geq 130$

Fonte: Projeto 02:136.01.004:2002 (ABNT, 2002)

Além do emprego da equação de fluxo de calor para a avaliação do desempenho térmico de paredes, tem-se a aplicação do método simplificado definido pelo projeto de norma brasileiro de desempenho de

edificações de até cinco pavimentos (ABNT, 2002). O método estabelece valores mínimos das propriedades térmicas de Transmitância Térmica (U) e Capacidade Térmica (C), para diferentes zonas do Brasil, como parâmetro normativo para avaliação de sistemas construtivos (ver tabelas 1 e 2).

Outro bom indicativo para avaliar o desempenho de paredes está na consideração da resposta global da edificação, a qual permite avaliar o desempenho dos painéis a partir da influência de todos os componentes de uma edificação, além das variáveis climáticas e ocupacionais. Este tipo de avaliação pode ser realizada por monitoramento ou por simulação computacional. No caso da comparação entre diferentes sistemas de vedação, o mais prático é o processo de simulação.

Dentre as diversas ferramentas de simulação, tem-se o COMFIE (PEUPORTIER e SOMMEREUX, 1992), o qual gera dados horários de temperatura interna para um ano inteiro, e permite assim, avaliar o desempenho térmico de um protótipo, quando exposto às variações climáticas do ano.

2. MÉTODO DE PESQUISA

Partindo-se da composição mínima do painel de vedação com uma câmara de ar não ventilada, foram realizadas mais três variações utilizando-se de materiais isolantes como lã de vidro, de redutores de emissividade e de uma segunda câmara de ar introduzida no painel. As composições definidas resultaram de um estudo bibliográfico a cerca de experimentações internacionais e nacionais de painéis de vedação em madeira. Os painéis foram comparados com paredes referenciais de baixo desempenho térmico – Parede Referencial A (PRA - formada por apenas tábua de 2,2 cm) e de bom desempenho térmico – Parede Referencial B (PRB - formada por alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocada dos dois lados).

A seguir, têm-se os painéis de vedação avaliados bem como as paredes referenciais de baixo desempenho térmico (PRA) e de bom desempenho (PRB).

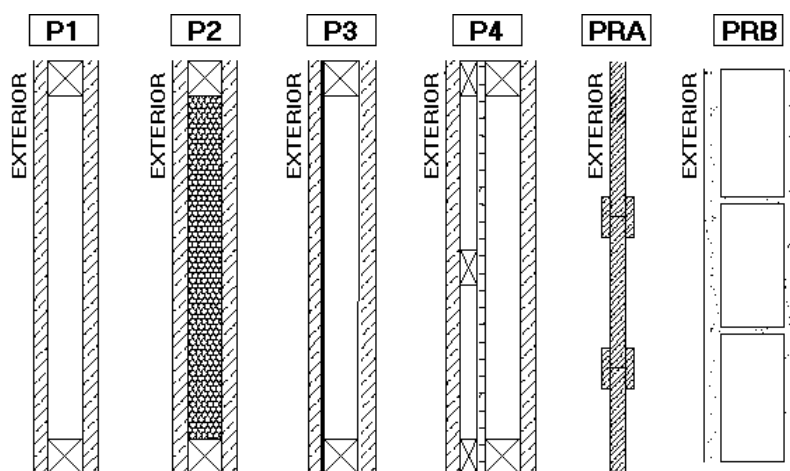


Figura 1: Composições dos Painéis de Vedação Avaliados

- P1 – Painel formado por tábua de pinus (exterior) de 2,2 cm + câmara de ar não ventilada de 5 cm + tábua de pinus de 2,2 cm (interior);
- P2 – Painel formado por tábua de pinus (exterior) de 2,2 cm + serragem (isolante térmico) + tábua de pinus de 2,2 cm (interior);
- P3 - Painel formado por tábua de pinus (exterior) de 2,2 cm + manta de alumínio + câmara de ar não ventilada de 5 cm + tábua de pinus (interior) de 2,2 cm;
- P4 - Painel formado por tábua de pinus (exterior) de 2,2 cm + câmara de ar não ventilada de 2,4 cm + chapa de OBS (Oriented Strand Board – Chapa de lascas de madeira orientadas) + câmara de ar não ventilada 5 cm + tábua de pinus (interior) de 2,2 cm;
- PRA – Parede referencial A, de baixo desempenho térmico – Tábua de 2,2 cm

- PRB – Parede referencial B, de bom desempenho térmico – Alvenaria de tijolos cerâmicos de seis furos rebocados dos dois lados.

Todas as paredes avaliadas foram consideradas com pintura externa e interna na cor branca ($\alpha = 0,3$ e $\varepsilon = 0,9$).

Em seguida, foram calculadas as propriedades térmicas dos painéis, segundo o projeto de norma brasileira de desempenho térmico, 02:135.07-002:1998 (ABNT, 1998). As paredes referenciais PRA e PRB também foram calculadas para efeito comparativo.

Tabela 3: Propriedades Térmicas dos Painéis de Vedação

Tipologia de Painel	Espessura (m)	Capacidade Térmica $\text{kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Transmitância Térmica $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	Resistência Térmica $(\text{m}^2 \cdot \text{K})/\text{W}$	Fator Solar (%)	Atraso Térmico (horas)
PRA	0,022 + mata-junta	17	2,93	0,3410	3,5	1,1
P1	0,094	33	1,55	0,6442	1,9	2,4
P2	0,094	37	0,75	1,3421	0,9	3,7
P3	0,094	33	1,21	0,8272	1,5	2,8
P4	0,13	51	1,12	0,8919	1,3	3,7
PRB	0,14	160	2,38	0,4202	2,9	3,6

Devido à introdução da câmara de ar, o painel P1 assumiu o dobro da resistência térmica em relação à parede PRA (parede formada por apenas tábuas de 2,2 cm). Com a introdução da lã de vidro em P2, novamente este valor é duplicado, em relação à P1.

Embora a PRB apresente maior capacidade térmica em relação aos painéis em madeira, seu atraso térmico, comparado com os painéis P2 e P4, são similares.

2.1 Aplicação da Equação do Fluxo de Calor

A equação do fluxo de calor (Eq. 01) foi aplicada com a temperatura do dia de solstício de verão (21 de dezembro), para face oeste, de maior exposição à radiação solar. Os valores de radiação solar incidentes sobre planos verticais foram obtidos de Frota e Schiffer (2001), para latitude $23^{\circ}30'$ Sul.

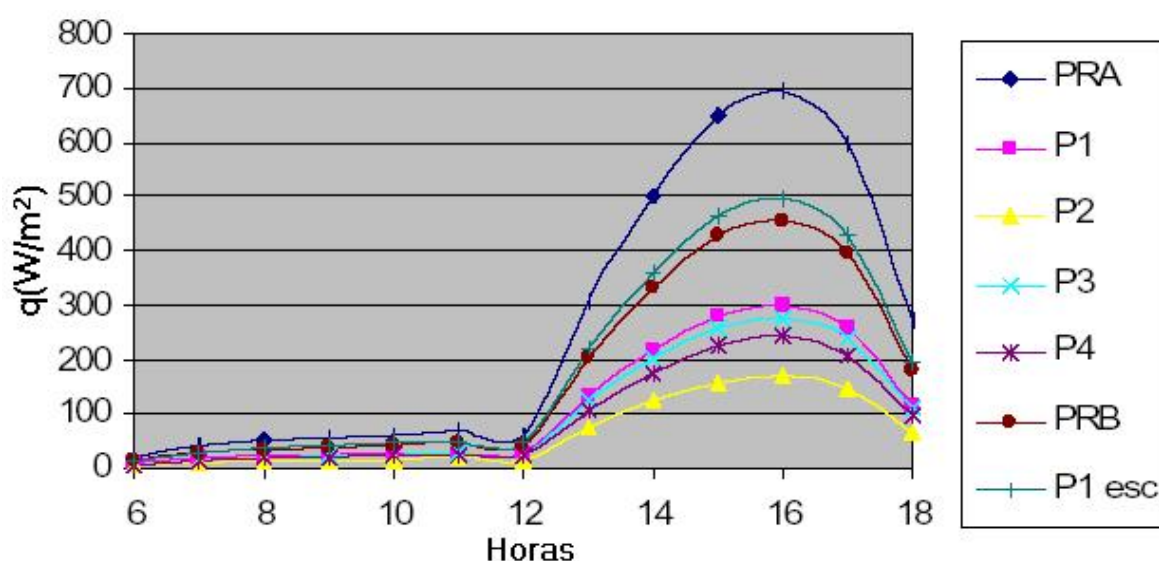


Figura 2 – Gráfico de Fluxo de Calor dos Painéis de Vedação, para Verão.

O valor da absorptância adotado para todos os fechamentos, exceto para P1 esc. (escuro), foi de 0,3, correspondente a pintura branca. O painel P1 esc. apresenta valor de absorptância de 0,5,

correspondente à cor natural da madeira de pinus. Assim, as variações ocorridas entre os painéis resultam dos diferentes valores de Transmitância Térmica (U) de cada fechamento, com a exceção do P1 esc., onde se avalia também, a influência da cor em superfícies verticais.

A partir do gráfico da figura 2 confirma-se a baixa aceitação da parede formada por apenas tábuas de madeira de 2,2 cm de espessura, muito utilizada nas habitações pioneiras do sul do país. O fluxo de calor foi maior nesse tipo de parede (PRA), mesmo ela sendo branca ($\alpha = 0,3$), devido ao seu alto valor de transmitância térmica (ver tabela 3). Já o painel P2 apresentou os menores valores de fluxo de calor devido à sua alta resistência térmica favorecida pelo isolante térmico. Os painéis P1, P3 e P4 obtiveram valores de fluxo de calor muito próximos, e menores do que os valores obtidos para a parede de alvenaria de tijolos cerâmicos rebocada dos dois lados (PRB).

2.2 Aplicação dos Critérios Estabelecidos pelo Projeto de Norma (ABNT, 2002)

Com os valores das propriedades térmicas já obtidas (ver tabela 3), fez-se a aplicação dos critérios definidos pelo método simplificado do projeto de norma de desempenho de edificações de até cinco pavimentos (ABNT, 2002), parte 04, item 10, para avaliar se os painéis de vedação em madeira, bem como paredes referenciais, estão dentro dos critérios mínimos de desempenho térmico.

Ressalta-se que o método simplificado do projeto de norma também apresenta diretrizes para a avaliação de áreas de abertura para ventilação em edificações além de requisitos de sombreamento. Entretanto, estes critérios não foram aplicados à pesquisa, já que está direcionada para avaliação de fechamentos verticais.

Para leitura dos valores de capacidade térmica, o projeto de norma especifica que, no caso de paredes com isolantes térmicos (coeficiente de condutibilidade menor ou igual a $0,065 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) ou câmara de ar com resistência térmica maior que $0,5 \text{ (m}^2\cdot\text{K)/W}$, o cálculo da capacidade térmica deve ser feito desprezando-se os materiais voltados para o ambiente externo a partir do isolante ou câmara de ar. Nesta situação, enquadra-se apenas o painel P2 composto por uma camada de isolante térmico. Embora sua capacidade térmica seja baixa, com a aplicação da norma, seu valor reduz para $18 \text{ kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$.

A seguir, têm-se os resultados da aplicação dos critérios definidos pelo projeto de norma para cada zona bioclimática brasileira.

Tabela 4: Resultado da aplicação dos critérios estabelecidos pelo projeto de norma

Propriedades Térmicas	Transmitância Térmica								Capacidade Térmica							
	Zonas Bioclimáticas								Zonas Bioclimáticas							
Tipologia de Painel	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8
PRA: tábuas simples	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
P1: tábuas + câmara ar 5 cm + tábuas	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I
P2: tábuas + isolante + tábuas	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I
P3: tábuas + câmara ar 5 cm + manta alumínio + tábuas	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I
P4: tábuas + câmara ar 2.4 cm + OSB + câmara ar 5 cm + tábuas	A	A	A	A	A	A	A	A	I	I	I	I	I	I	I	I
PRB: tijolo cerâmico + reboco	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
A – Desempenho adequado								I - Desempenho Inadequado								

Novamente, confirma-se a baixa eficiência da parede PRA, fato já constatado também por Barth e Bogo (2003) em pesquisa realizada com paredes de habitações pioneiras no estado de Santa Catarina.

A partir dos resultados acima, tem-se a aprovação de todas as paredes, com exceção de PRA, para a propriedade de transmitância térmica, para todas as regiões do país. Em contrapartida, tem-se a

inadequação de todos os painéis de vedação em madeira quanto à capacidade térmica. A parede de tijolos cerâmicos responde positivamente às duas propriedades, segunda a norma brasileira.

Devido à baixa densidade da madeira, de sua pequena espessura e da inexistência de componentes do painel que apresentem elevada capacidade térmica, seu valor final tende a ser baixo. O fato de não armazenar calor em sua estrutura possibilita que as temperaturas internas da edificação acabem por acompanhar as variações climáticas externas. Já as paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos, que apresentam alta capacidade de armazenar calor, ajudam a diminuir as oscilações da temperatura exterior.

2.3 Aplicação da ferramenta de simulação COMFIE

Sendo a última etapa da pesquisa, procedeu-se a simulação a partir de um protótipo padrão, com variações apenas dos painéis de vedação estudados além das paredes referenciais (PRA e PRB).

O protótipo adotado para simulação apresenta área de 40 m², cobertura bem protegida formada por telhas cerâmicas com pintura externa branca ($\alpha = 0,3$), câmara de ar não ventilada de 45 cm, redutor de emissividade aplicado sobre forro de madeira de pinus, além de pouca ventilação na edificação, para que as renovações de ar não interfiram nos resultados de desempenhos das paredes.

O protótipo foi inserido no clima da cidade de Londrina, Paraná, com entrada de dados do TRY (test reference year) de 1996. Com os dados horários de temperatura gerados para o ano inteiro, foram aplicados os limites de temperatura que atendem ao conforto térmico dentro dos intervalos de 18 °C a 29 °C (GIVONI, 1992), avaliando a porcentagem das horas dentro dos limites de conforto térmico e a porcentagem fora dos limites estabelecidos.

As porcentagens de horas de conforto dentro dos limites de temperatura entre 18 °C e 29 °C, variaram em função apenas da modificação dos fechamentos verticais. Fatores como fechamento horizontal, ventilação, ocupação e clima estiveram constantes ao longo das simulações para todas as situações de painéis e paredes.

Têm-se, a seguir, os resultados da simulação para cada situação de painel de vedação, além do clima externo.

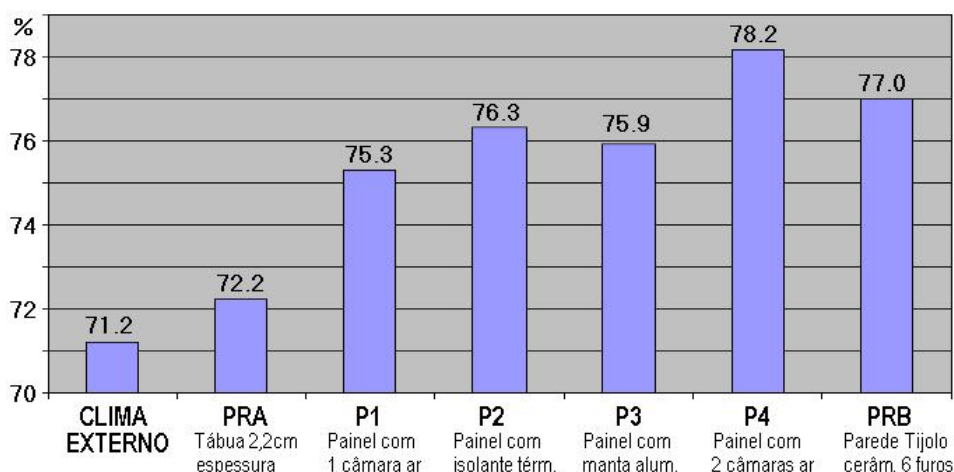


Figura 3: Porcentagem de Horas Dentro do Intervalo entre 18°C e 29°C (zona de conforto) para cada Variação de Painel de Vedação e Paredes Referenciais

No processo de simulação, houve um acréscimo de 3% de horas de conforto anuais apenas com a mudança da parede de tábuas (PRA) para o painel duplo simples (P1) (ver figura 3). A partir daí, as variações dos painéis foram pouco expressivas quanto os ganhos de horas de conforto, com exceção de P4, que com acréscimo de 3% em horas dentro dos limites de conforto, em relação ao P1, obteve o melhor desempenho térmico.

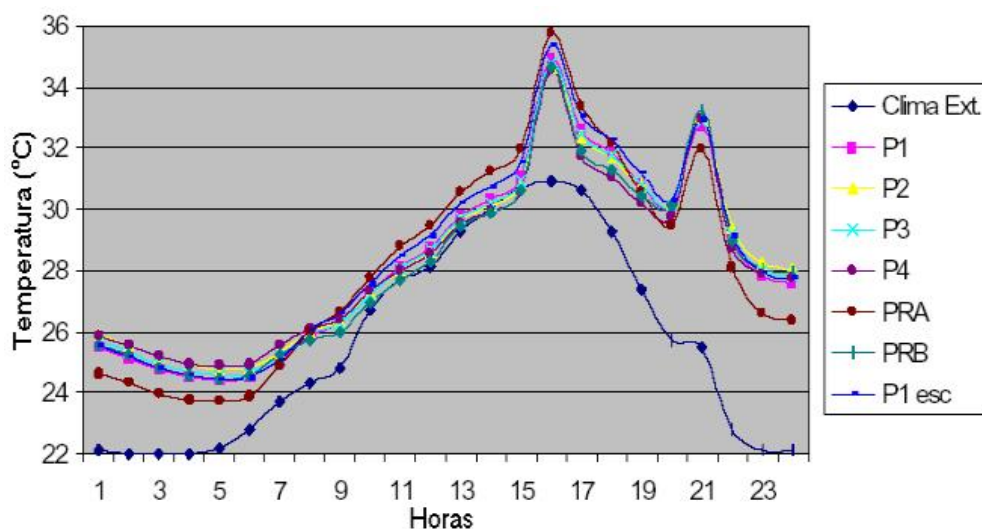


Figura 4: Gráfico Comparativo das Temperaturas Internas com Variações dos Painéis de Vedação, para o Dia de Solstício de Verão.

Na figura 4, tem-se a variação da temperatura interna ao longo do dia de solstício de verão. A PRA acompanha as oscilações da temperatura do clima externo enquanto que os painéis duplos e PRB mantêm certo equilíbrio. Nota-se que, durante o dia, o protótipo com painéis duplos apresenta temperaturas internas mais altas do que o protótipo simulado com PRB. No entanto, no período noturno, o protótipo com a PRB passa a assumir temperaturas internas mais altas, liberando o calor armazenado durante o dia, para o ambiente.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados finais demonstram divergências entre métodos de avaliação de desempenho térmico por simulação (ferramenta COMFIE) e por prescrição (projeto de norma brasileira).

A análise comparativa dos painéis segundo a equação de fluxo de calor determinou menores ganhos de calor nos painéis P1, P2, P3 e P4, resultado considerado como bom indicativo de desempenho térmico. Já a parede PRB e P1 esc., com superfície externa na cor natural da madeira de pinus, apresentaram valores de fluxo de calor maiores e mais próximos da parede de tábuas (PRA).

O cálculo do fluxo de calor considera a influência de fatores diretamente ligados aos fechamentos verticais. A influência da cor, da radiação solar incidente sobre planos verticais e da transmitância térmica, presentes na equação de fluxo de calor, são uns dos principais indicadores de desempenho térmico de paredes. Entretanto, além deles, a inércia térmica também exerce papel fundamental no conforto de um ambiente, tornando mais lento o ganho de calor para o interior da habitação, o que minimiza as oscilações internas da temperatura.

O projeto de norma brasileira de edificações de até cinco pavimentos (ABNT, 2002) especifica valores baixos de capacidade térmica para paredes, o que torna inadequado o desempenho térmico de qualquer tipo de painel de vedação em madeira de composição enxuta e usualmente empregado nos países desenvolvidos. No caso dos painéis em madeira avaliados, todos foram considerados inadequados pela norma brasileira.

Por outro lado, no método realizado por simulação, os valores demonstram que o melhor desempenho obtido no protótipo deu-se com o emprego do painel P4, com duas câmaras de ar. Este painel apresenta alta resistência térmica e valor de atraso térmico próximo ao da parede de tijolos, o que promoveu desempenho de forma eficiente já que a porcentagem de horas de conforto para PRB ficou um pouco abaixo dele.

A baixa inércia térmica dos painéis em madeira pode ser compensada com a presença de câmaras de ar, isolantes térmicos e redutores de emissividade. Todas as variações de painéis duplos aqui

simulados apresentaram bons resultados perante todo o conjunto. Isso porque seus valores de horas de conforto foram próximos ou superiores em relação à parede tradicional de alvenaria de tijolos cerâmicos, composição já consolidada em desempenho térmico no país.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Aperfeiçoar um sistema construtivo alternativo, de baixo impacto ambiental, altamente empregado por países desenvolvidos e cujo material existe em abundância em algumas regiões do Brasil, sob aspecto do desempenho térmico, contribui para a mudança do paradigma de que todas as casas em madeira são desconfortáveis termicamente. Os painéis duplos apresentaram bom desempenho térmico para aplicação na cidade de Londrina, Paraná; ao contrário da parede formada por apenas tábua; e necessitam de uma melhor avaliação a partir do projeto de norma brasileira para o seu emprego satisfatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. - *Desempenho Térmico de Edificações – Parte 1, 2, 3 e 4*. 1998. Disponível em www.labee.ufsc.br/conforto/normas/index.htm.

_____. - *Desempenho de Edificações de até Cinco Pavimentos – Partes 1 e 4*. 2002. Disponível em www.cobracon.org.br.

BARBOSA, M.J. *Arquivos Climáticos de Interesse para a Edificação nas Regiões de Londrina e Cascavel (PR)*. Londrina: UEL, 1999.

BARTH, F.; MENDES, R. *Análise do Desempenho Térmico de Fachadas Ventiladas com Tijolos cerâmicos Segundo o Projeto de Norma Brasileira – Desempenho Térmico de Edificações*. In: V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Fortaleza, 1999. Anais do ENCAC.

BARTH, F.; BOGO, Amílcar. *Habitação em madeira em Santa Catarina: Análise de desempenho térmico de paredes*. In: I Congresso Brasileiro sobre Habitação Social - Ciência e Tecnologia, 2003, Florianópolis. Anais do I Congresso Brasileiro sobre Habitação Social - Ciência e Tecnologia. Florianópolis: CTHAB, 2003. v. 1. p. 47-47

CANADIAN WOOD COUNCIL. *Introduction to Wood Building Technology*. Ottawa - Canada: Tri-Graphic Printing, 1997, 430p.

GIVONI, B. *Comfort, Climate Analysis and Building Design Guidelines*. In: *Energy and Building*, vol 18, July/1992, p. 11-23.

PEUPOORTIER, B.; SOMMEREUX, I. B. *Comfie Passive solar design tool for multizone buildings – User's Manual* Centre d'Énergétique, Ecole des Mines de Paris. Version 2.0 jan. 1992.

RIVERO, Roberto (1985). *Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural*. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 240p. il. 1ª edição.

UCHOA, S. B. B. *Condutividade Térmica da Madeira*. São Carlos 161p. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo