

BARREIRAS TÉRMICAS COM MUDANÇA DE FASE PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NO AMBIENTE CONSTRUIDO

George Stanescu (1); Vinícius Pons (2); Aloísio Leoni Schmid (3)

(1) Dr.Eng, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
stanescu@ufpr.br

(2) Arquiteto, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
vinicius@arqpons.com

(3) Dr.Eng, Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil
aloisio.schmid@gmail.com

Universidade Federal do Paraná, Centro Politécnico, Cx Postal 19011, Curitiba-Paraná, 81531-980
Tel.: (41) 3361 3110

RESUMO

Visando uma melhor compreensão sobre o possível uso de alguns novos materiais com mudança de fase entre sólido e líquido (MMF) disponíveis no mercado, neste estudo está sendo avaliado o desempenho de várias configurações de paredes de alvenaria e emboço de argamassa com ou sem isolamento térmico ou barreiras térmicas de MMF. A modelagem física é realizada considerando a massa de material correspondente em cada camada a uma área externa de parede de 1 m^2 como um sistema fechado. Com base nas equações de conservação de energia para cada camada de material, formulou-se um sistema de ODE que permite estudar efeitos das condições climáticas (temperatura do ar atmosférico, radiação térmica solar) sobre comportamento térmico das paredes exteriores e sobre o consumo energético necessário para manutenção do conforto térmico. O estudo foi desenvolvido para as condições climáticas de Curitiba, Paraná, Brasil. Foi considerado o emprego de barreiras térmicas com MMF e isolamento térmico do tipo poliestireno expandido. Somente pelo uso de camadas isolantes ou barreiras térmicas, é avaliado entre 18% e 86% o potencial de redução do consumo de energia elétrica e das emissões por unidade de área de parede. Valores entre 61% e 97% são calculados quando se emprega simultaneamente uma estratégia energética que prioriza o controle e manutenção do conforto térmico pelo aproveitamento da diferença de temperaturas entre o ar interno e o ar atmosférico.

Palavras-chave: conforto térmico, redução de consumo, redução de emissões de CO_2 , barreiras térmicas com MMF.

ABSTRACT

For a better understanding of possible use of some new phase change materials (PCM) available on the market, this study presents an evaluation of the performance of various masonry and mortar plaster walls settings, with or without thermal insulation or PCM thermal barriers. Physical modeling is performed by considering a closed system the mass of material corresponding to an outer wall area of 1 m^2 for each layer. The energy conservation equations for each layer of material represent an ODE system that allows studying effects of the climate conditions (temperature of atmospheric air, solar thermal radiation) on thermal behavior of the walls and on the necessary energy consumption for maintaining thermal comfort. Study was conducted for the weather conditions in Curitiba, Paraná, Brazil. We considered the use of PCM thermal barriers and expanded polystyrene type thermal insulation. Only by the use of insulating layers or thermal barriers, it is rated between 18% and 86% the potential to reduce the energy consumption and emissions by wall unit area. Values between 61% and 97% are calculated when it is also considered the using of an energy strategy which gives priority to the control and maintenance of thermal comfort by the use of the temperature difference between the indoor air and the atmospheric air.

Keywords: thermal comfort, energy consumption reduction, CO_2 emission reduction, PCM thermal barriers.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de materiais com mudança de fase entre sólido e líquido (MMF) em edificações vem sendo testada em diversas pesquisas, visando reduzir o consumo energético para manutenção do conforto térmico em ambiente construído. Cabeza *et al.* (2007) utilizaram o produto Micronal PCM da BASF (temperatura de fusão 26°C e entalpia de mudança de fase de 110 kJ/ kg) misturado ao concreto, em uma placa de 0,12 m de espessura. Verificando experimentalmente o desempenho nos meses de primavera e verão, eles evidenciaram uma redução efetiva da amplitude térmica interna. Halford e Boehm (2007) estudaram a influência de vedações do tipo “Isolante + MMF + Isolante” com MMF de tipo inorgânico (sal hidratado). Os resultados mostraram uma redução de até 25% do fluxo térmico transferido entre as camadas externa e interna da parede. Resultados da pesquisa desenvolvida por Soares *et al.* (2014), testando em condições variadas de aplicação em elementos construtivos e para diferentes localidades, mostraram que a utilização de MMF reduz, no mínimo, em 15% a carga de aquecimento ou resfriamento necessária para o controle do conforto térmico interno de edificações (intervalo entre 20°C e 25°C durante o horário comercial e 15°C e 25°C no restante do dia). Este trabalho apresenta um estudo sobre o potencial desses novos materiais para a redução de consumo de energia em ambiente construído quando priorizar o controle e manutenção do conforto térmico pelo aproveitamento da diferença de temperaturas entre o ar interno e o ar atmosférico.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo uma avaliação comparativa do potencial de redução de consumo de energia em ambientes construídos pelo uso de barreiras térmicas com mudança de fase entre sólido e líquido e de estratégias energéticas, priorizando controle e manutenção do conforto térmico pelo aproveitamento da diferença de temperaturas entre o ar interno e o ar atmosférico.

3. MÉTODO

Este estudo foi desenvolvido com base no método de simulação numérica para sistemas físicos e apresenta a seguinte sequência:

- Modelagem física da parede multicamada em interação térmica com o ar atmosférico na superfície externa e com ar interno ao ambiente construído mantido a temperatura constante T_{int} conforme requisito de conforto ambiental.
- Modelagem matemática baseada nas leis de conservação de massa e energia.
- Simulação numérica de desempenho de várias configurações de paredes multicamadas com relação ao consumo de energia para controle e manutenção do conforto térmico.

Junto aos consumos de energia térmica para aquecimento e resfriamento, o consumo mínimo teórico inevitável de energia elétrica está sendo avaliado neste trabalho, assumindo-se uma estratégia energética que priorize o uso de ventilação ou interação térmica sempre que há possibilidade de controle e manutenção do conforto térmico pelo aproveitamento da diferença de temperatura entre o ar interno e o ar atmosférico. Quando o consumo de energia da rede é inevitável, assume-se aquecimento realizado com bomba de calor ou refrigeração com base num ciclo de Carnot invertido.

3.1. Modelo físico

A modelagem física é realizada considerando um sistema fechado de massa de material correspondente em cada camada a uma área externa de parede $A=1 \text{ m}^2$, como mostrado na Figura 1. Considera-se o emprego de barreiras térmicas com materiais com mudança de fase entre sólido e líquido (MMF) em paredes de alvenaria e emboço de argamassa.

Foram consideradas cinco configurações de paredes multicamada, realizadas de alvenaria e emboço de argamassa em combinação com camadas de tipo poliestireno ou com barreiras térmicas de MMF. São apresentadas na Figura 2.

3.2. Modelo matemático

Baseado nas equações de conservação de energia para cada um dos sistemas fechados definidos conforme apresentado no parágrafo anterior, um sistema de equações diferenciais ordinárias foi escrito para estudar os efeitos das condições climáticas (temperatura do ar atmosférico, radiação térmica solar) sobre comportamento térmico das paredes exteriores e sobre o consumo energético necessário para manutenção do conforto térmico:

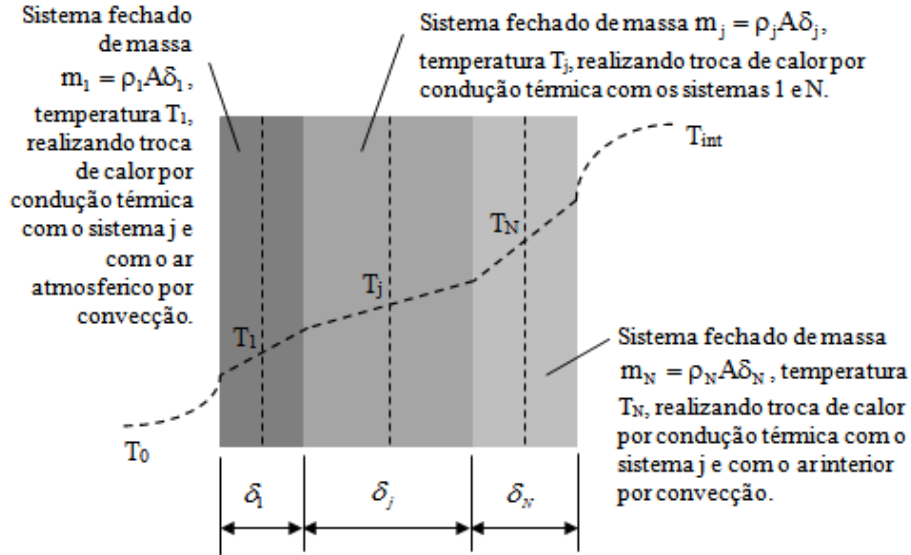


Figura 1 – Modelagem física com sistemas fechados de uma parede com três camadas. Em cada camada a massa de material correspondente a uma área externa $A=1 \text{ m}^2$ representa um sistema fechado.

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{\rho_1 \delta_1 C_1} \left(\frac{\dot{Q}_s}{A} + \frac{T_0 - T_1}{1/h_0 + 0.5\delta_1/\lambda_1} - \frac{T_1 - T_2}{0.5\delta_1/\lambda_1 + 0.5\delta_2/\lambda_2} \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$\frac{dT_j}{dt} = \frac{1}{\rho_j \delta_j C_j} \left(\frac{T_{j-1} - T_j}{0.5\delta_{j-1}/\lambda_{j-1} + 0.5\delta_j/\lambda_j} - \frac{T_j - T_{j+1}}{0.5\delta_j/\lambda_j + 0.5\delta_{j+1}/\lambda_{j+1}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

($2 \leq j \leq N-1$)

$$\frac{dT_N}{dt} = \frac{1}{\rho_N \delta_N C_N} \left(\frac{T_{N-1} - T_N}{0.5\delta_{N-1}/\lambda_{N-1} + 0.5\delta_N/\lambda_N} - \frac{T_N - T_{int}}{0.5\delta_N/\lambda_N + 1/h_{int}} \right) \quad \text{Equação 3}$$

Nas equações acima, N representa o número de camadas de materiais diferentes na configuração considerada, C representa o calor específico mássico [J/KgK], h – o coeficiente de convecção caracterizando a interação térmica entre a superfície externa da parede e o ar [W/m²K], \dot{Q}_s é o fluxo de energia devido à radiação térmica solar [kW], T a temperatura [°C] e t o tempo [s]. O significado das letras do alfabeto grego é: δ - espessura da camada de material [m], λ - condutividade térmica [W/mK] e ρ - massa específica [kg/m³]. Os subscritos “0” e “int” são respectivamente para ar atmosférico e ar interno e “j” para as camadas de material na estrutura da parede.

As seguintes hipóteses simplificadoras foram assumidas: a transferência de calor ocorre somente em direção perpendicular às superfícies externas da parede; as propriedades físicas dos materiais são constantes.

O consumo de energia para fins de manutenção do conforto térmico (aquecimento ou resfriamento) ocorre devido ao calor que atravessa a superfície interna da parede quando se assumir constante a temperatura do ar interno e dentro da faixa de conforto.

$$\tilde{Q}_{AQ} = \frac{1}{2A} \int_0^{8760} \left(1 - \frac{T_N - T_{int}}{|T_N - T_{int}|} \right) \frac{|T_N - T_{int}|}{0.5\delta_N/\lambda_N + 1/h_{int}} dt \quad \text{Equação 4}$$

$$\tilde{Q}_R = \frac{1}{2A} \int_0^{8760} \left(1 + \frac{T_N - T_{int}}{|T_N - T_{int}|} \right) \frac{T_N - T_{int}}{0.5\delta_N/\lambda_N + 1/h_{int}} dt \quad \text{Equação 5}$$

Quando esse fluxo térmico é positivo ($T_N \geq T_{int}$), ele tende a aumentar T_{int} e há necessidade de resfriamento, e quando negativo ($T_N < T_{int}$), ele tende a reduzir a temperatura do ar interno fazendo necessário o aquecimento (Figura 3). Desta maneira, a demanda anual de energia térmica para aquecimento

(\tilde{Q}_{AQ}) e resfriamento (\tilde{Q}_R) é calculada por unidade de área de parede somando separadamente os termos positivos e negativos.

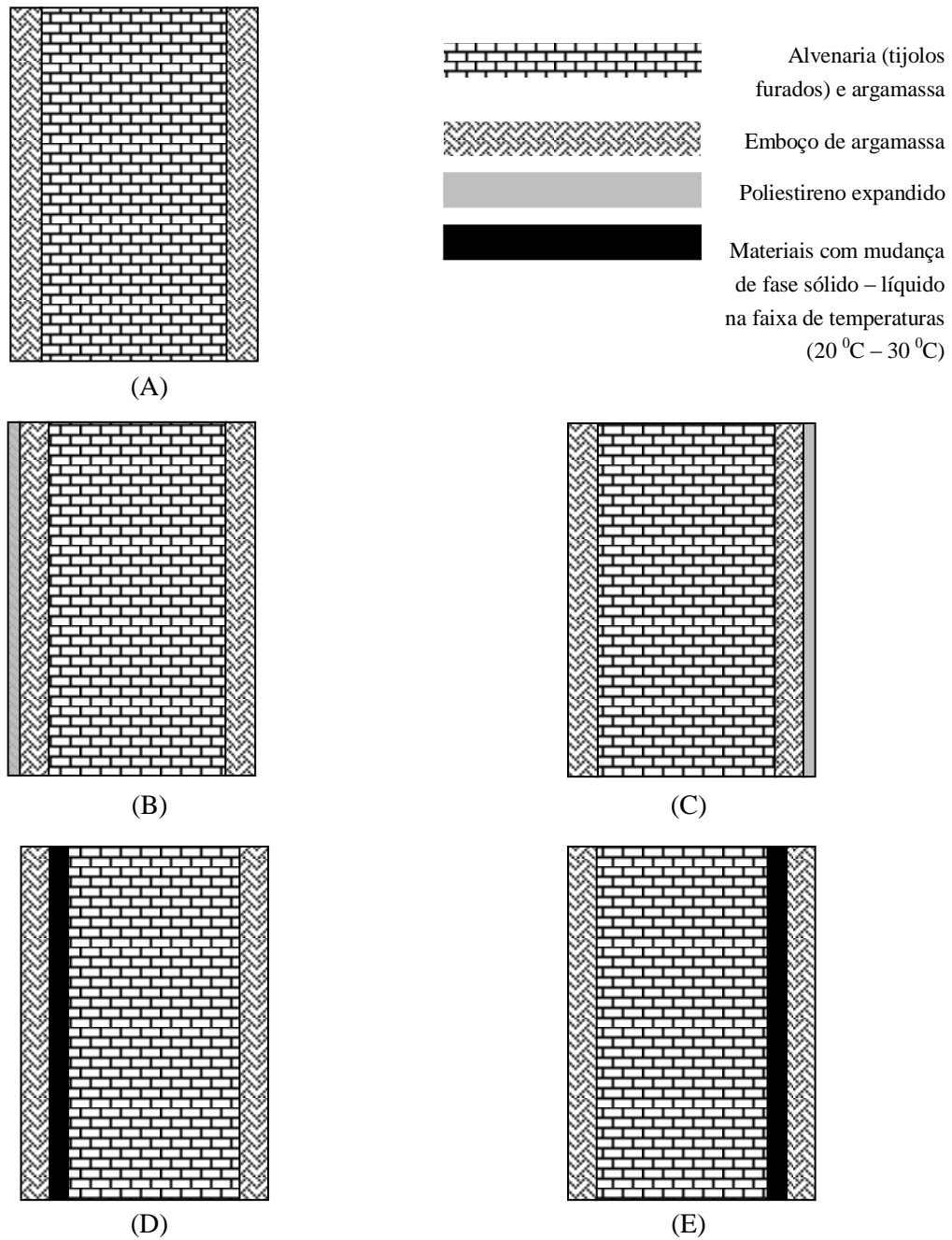


Figura 2 – Diversas configurações de paredes de alvenaria e emboço de argamassa com ou sem isolamento/ barreira térmica:

- (A) Parede de alvenaria e emboço de argamassa - configuração de referência.
- (B) Parede de alvenaria e emboço de argamassa com isolamento térmico de poliestireno expandido fixado na superfície externa da parede.
- (C) Parede de alvenaria e emboço de argamassa com isolamento térmico de poliestireno expandido fixado na superfície interna da parede.
- (D) Parede de alvenaria e emboço de argamassa com barreira térmica com mudança de fase do lado externo da parede.
- (E) Parede de alvenaria e emboço de argamassa com barreira térmica com mudança de fase do lado interno da parede.

3.2.1. Modelagem matemática do funcionamento de barreiras térmicas com mudança de fase

O estudo e a modelagem do comportamento de paredes com barreira térmica com mudança de fase são realizados considerando os dois possíveis regimes de funcionamento.

Os processos que ocorrem a temperaturas abaixo ou acima da temperatura de fusão (T_{MMF}), quando o material apresenta somente fase sólida ou líquida respectivamente, são descritos pela Equação 2.

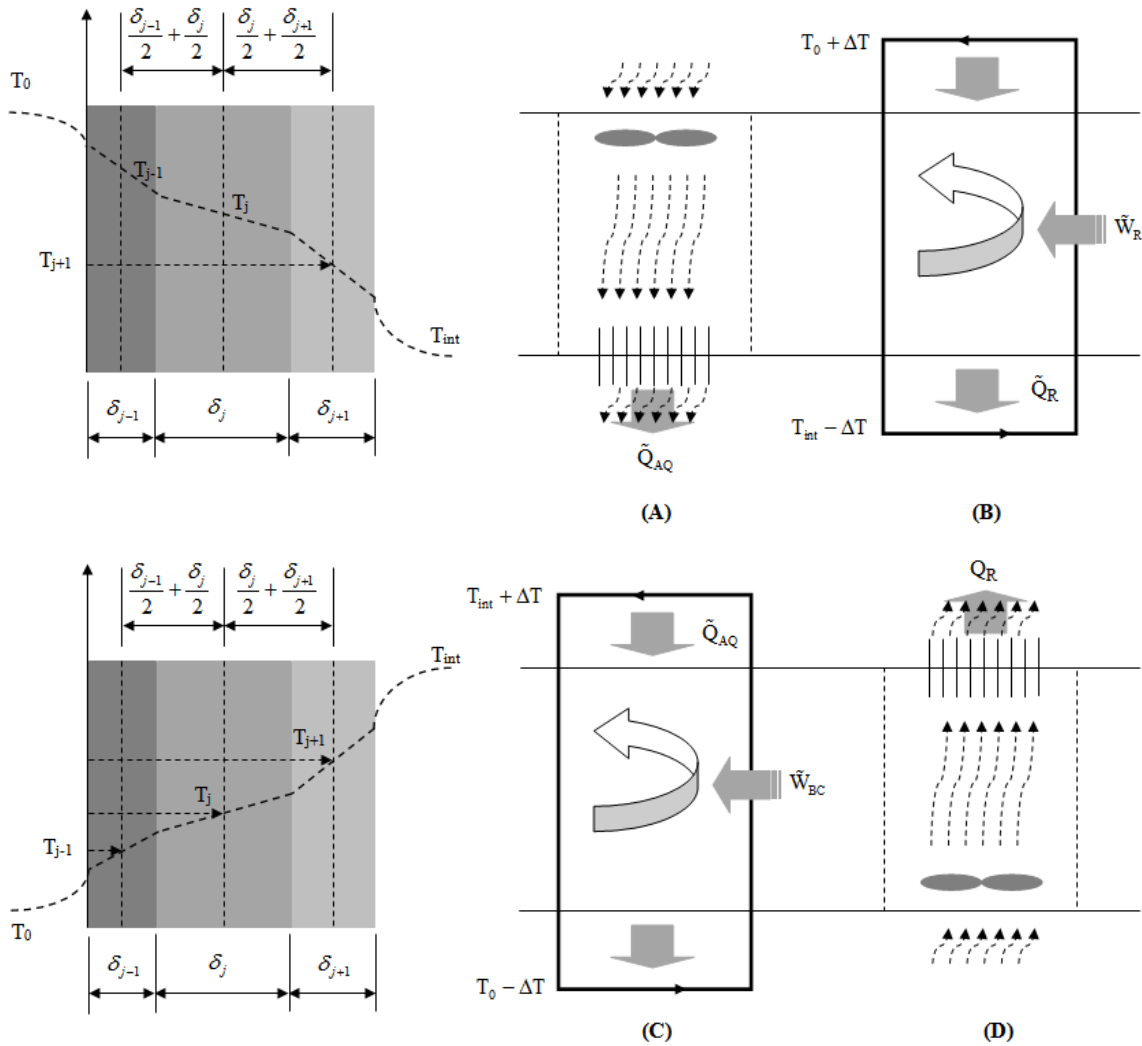


Figura 3 – Estratégia para a redução de consumo de energia e aumento da sustentabilidade no ambiente construído:

- (A) Aquecimento do ar interno através de ventilação ou com trocadores de calor quando há aproveitamento da diferença entre as temperaturas do ar interno e do ar atmosférico, $T_0 > T_{int}$.
- (B) Redução de temperatura do ar interno por refrigeração baseada em ciclo de Carnot invertido.
- (C) Aquecimento do ar interno com bomba de calor funcionando conforme ciclo de Carnot invertido
- (D) Redução de temperatura do ar interno através de ventilação ou com trocadores de calor quando há aproveitamento da diferença de temperaturas entre o ar interno e o ar atmosférico, $T_0 < T_{int}$.

Quando temperatura atinge o valor T_{MMF} começa o processo de mudança de fase. Caso o sólido seja aquecido até MMF e continue recebendo calor, ocorre uma liquefação gradual da massa de sólido. Quando líquido é resfriado até T_{MMF} e se continua removendo calor dele, isso desencadeia o processo de solidificação gradual da massa de líquido. No modelo matemático para estudo desses processos a Equação 2 é substituída pela Equação 6, e os fluxos térmicos são determinados considerando T_j constante e igual à T_{MMF} .

$$\frac{d\tilde{m}_\ell}{dt} = \frac{1}{\Delta h_{sl}} \left(\frac{T_{j-1} - T_{MMF}}{0.5\delta_{j-1}/\lambda_{j-1} + 0.5\delta_j/\lambda_j} - \frac{T_{MMF} - T_{j+1}}{0.5\delta_j/\lambda_j + 0.5\delta_{j+1}/\lambda_{j+1}} \right) \quad \text{Equação 6}$$

3.3. Simulação numérica

A estimativa da demanda de energia para controle e manutenção do conforto térmico foi realizada através de simulação numérica de desempenho de várias configurações de paredes. O sistema de equações diferenciais 1, 2, 3 e 6 foi integrado usando o método de Runge-Kutta da 4ª ordem (CHENEY and KINCAID, 2014). Com base nos resultados numéricos obtidos, calculou-se o necessário anual de energia térmica para aquecimento (\tilde{Q}_{AQ}) e resfriamento (\tilde{Q}_R) com as equações 4 e 5.

4. RESULTADOS NUMÉRICOS

O estudo foi desenvolvido para as condições climáticas de Curitiba, Paraná, Brasil conforme dados do Climate Design Data 2009 ASHRAE Handbook (2009). Dois tipos de materiais com mudança de fase sólido – líquido disponíveis no mercado foram considerados para efeito de barreira térmica (Tabela 1).

Tabela 1 – Características dos MMF disponíveis no mercado visados para emprego em barreiras térmicas.

Material	Temperatura de fusão	Entalpia de fusão	Densidade	Condutividade térmica	Calor específico
	T_{MMF} [$^{\circ}C$]	Δh_{sc} [kJ/kg]	ρ [kg/m ³]	λ [W/(mK)]	C [J/(kgK)]
C18 (wax paraffin type) (SARI e KARAIPEKLI, 2007)	+28	244	814	0,358	1930
PCM-HS24P Hydrated Salt (Website da RGEES, LLC)	+24	185	1540	0,358	1930

Os resultados numéricos são calculados com base no modelo matemático apresentado, levando em consideração os dados estáticos relativos à variação média horária da temperatura do ar atmosférico e da radiação térmica solar durante um ano (8760 horas) e as diversas configurações de paredes anteriormente descritas.

4.1. Configuração de referência

O consumo total anual de energia térmica (aquecimento e resfriamento) por unidade de área de parede de alvenaria e emboço de argamassa é determinado considerando temperatura do ar interno constante, $T_{int}=22^{\circ}C$. Valores típicos de características físicas dos materiais considerados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Características físicas de materiais utilizados em paredes de tijolos e argamassa.

Material	Condutividade térmica	Densidade	Calor específico
	λ [W/(mK)]	ρ [kg/m ³]	C [J/(kgK)]
Alvenaria (tijolos furados) e argamassa	0,75	1500	1000
Emboço	0,60	1800	1000

Os resultados numéricos apresentados nas Figuras 4 e 5 foram determinados assumindo espessura da camada de argamassa (emboço) dos dois lados da parede igual a $\delta_1 = \delta_3 = 0,01$ m, espessura da camada central (tijolos) igual a $\delta_2 = 0,15$ m e valores típicos para os coeficientes de convecção $h_0 = 23$ W/(m²K) e $h_{int} = 8$ W/(m²K) nas superfícies externa e interna respectivamente. As curvas na Figura 4 demonstram que o modelo matemático desenvolvido reproduz as variações de temperatura nas camadas internas da parede devido à alteração das condições climáticas. A temperatura máxima calculada na camada exterior da parede atinge $37,5^{\circ}C$ devido ao recebimento de energia por radiação térmica solar, enquanto o mínimo de temperatura na parede é de $11,4^{\circ}C$ no intervalo de 8760 horas.

Na Figura 5 estão sendo apresentados os consumos de energia térmica para aquecimento (\tilde{Q}_{AQ}) e resfriamento (\tilde{Q}_R) e o consumo mínimo teórico inevitável de energia elétrica (\tilde{W}_{min}) calculado com base na estratégia energética que prioriza o uso de ventilação ou de trocadores de calor sempre que há diferença de temperatura entre o ar interno e o ar atmosférico. Quando o consumo de energia para controle e manutenção do conforto térmico é inevitável ($T_0 \geq T_{int}$ e $T_N \geq T_{int}$ ou $T_0 < T_{int}$ e $T_N < T_{int}$), assume-se aquecimento realizado com bomba de calor ($\delta\tilde{W}_{min} = \delta\tilde{Q}_R / COP_{BC}$) ou refrigeração com base num ciclo Carnot invertido ($\delta\tilde{W}_{min} = \delta\tilde{Q}_{AQ} / COP_R$). Neste trabalho o valor $T_{int} = 22^{\circ}C$ foi adotado por corresponder ao centro da faixa de conforto térmico da ASHRAE (2009).

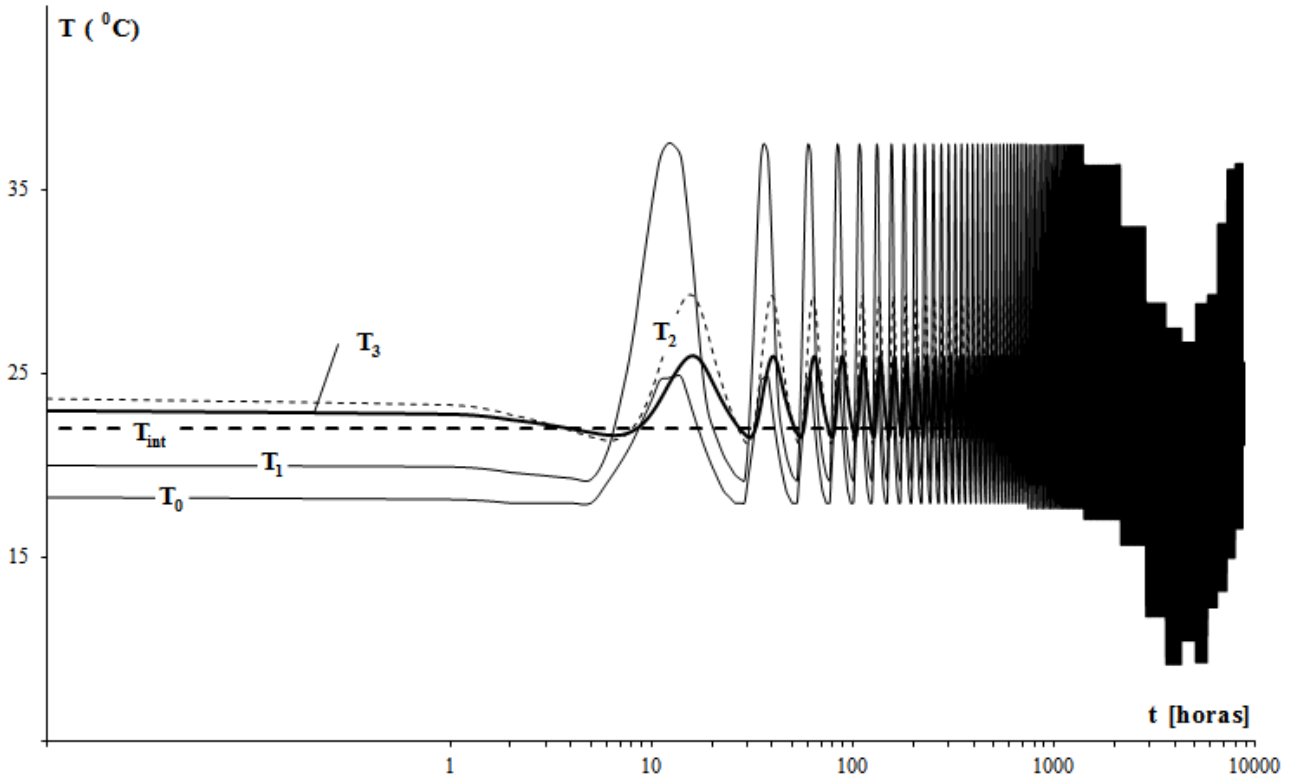


Figura 4 – Variação da temperatura de diversas camadas na parede de alvenaria e emboço de argamassa.

Os termos COP_{BC} e COP_R representam os coeficientes de desempenho da bomba de calor e do refrigerador funcionando de maneira reversível entre $T_0 - \Delta T$ e $T_{int} + \Delta T$, respectivamente $T_0 + \Delta T$ e $T_{int} - \Delta T$. Resultados apresentados na Tabela 3 foram calculados considerando $\Delta T = 20^\circ C$.

$$\tilde{W}_{\min} = \frac{1}{2COP} \int_0^{8760} \left(1 + \frac{T_N - T_{int}}{|T_N - T_{int}|} \frac{T_0 - T_{int}}{|T_0 - T_{int}|} \right) \frac{|T_N - T_{int}|}{0.5\delta_N / \lambda_N + 1/h_{int}} dt \quad \text{Equação 7}$$

Os resultados apresentados na Figura 5, calculados conforme condições climáticas de Curitiba, indicam um grande potencial de redução do consumo de energia baseado numa estratégia energética do tipo descrito neste trabalho. O retângulo de cor cinza identifica o intervalo de tempo quando a necessidade de aquecimento aumenta (linha fina ascendente) enquanto não há consumo para refrigeração (linha fina pontilhada). Observa-se que há uma boa coincidência entre os resultados numéricos e o período de inverno que ocorre naturalmente. Conforme os resultados numéricos obtidos, a demanda de energia para refrigeração apresenta variação significativa no período de setembro até abril, o que é bastante realístico.

O potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa é avaliado também pela diminuição da emissão de dióxido de carbono associada ao consumo unitário anual de energia e considerando o fator médio anual (0,1355 kg CO_2 / kWh) divulgado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia para 2014 (Portal do MCTI).

Os valores calculados para os consumos unitários e anuais e as emissões associadas são apresentados de maneira sintética na Tabela 3. Para efeito de comparação está sendo avaliada também a demanda de energia elétrica real \tilde{W} baseada na hipótese de aquecimento por dissipação de energia elétrica com eficiência de 100% e resfriamento com equipamentos de refrigeração com coeficiente de desempenho $COP=5$, $\tilde{W} = \tilde{Q}_{AQ} + \tilde{Q}_R / COP$.

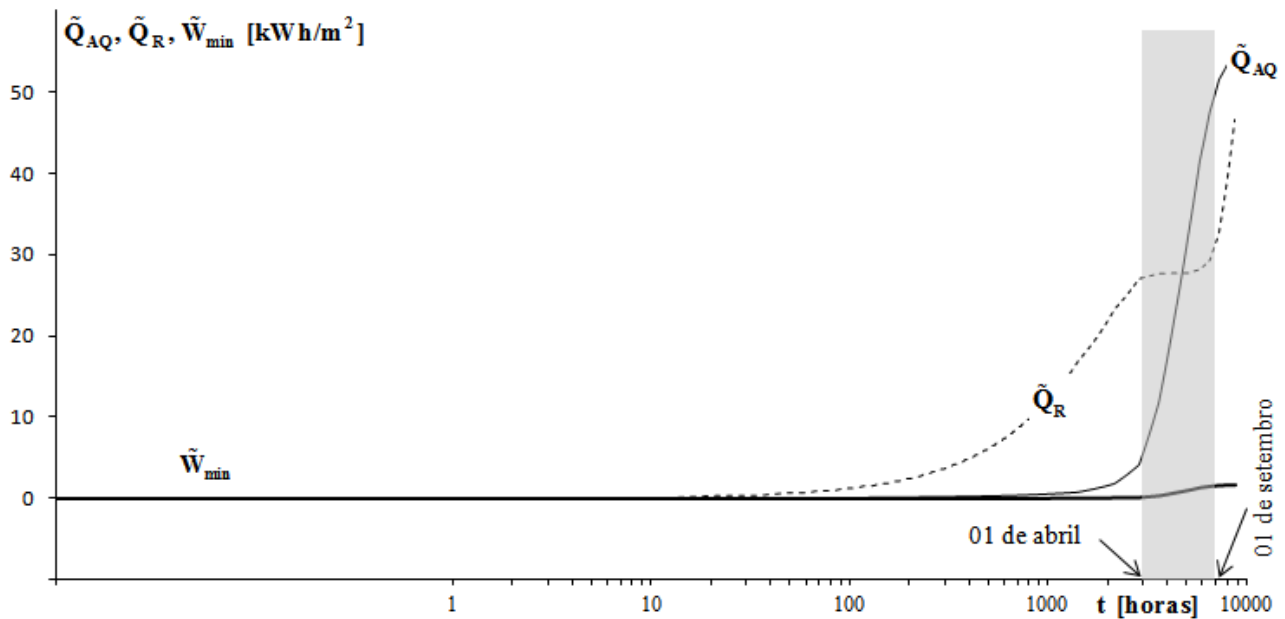


Figura 5 – Variação do consumo de energia térmica para aquecimento e refrigeração e do consumo mínimo teórico de eletricidade calculado com base na estratégia energética que prioriza aproveitamento da diferença entre a temperatura do ar interno e do ar atmosférico.

Tabela 3 – Consumos unitários anuais de energia.

Configuração (Figura 2)		\tilde{Q}_{AQ}	\tilde{Q}_R	\tilde{W}	\tilde{W}_{min}
		kWh/(m ² ·ano)	kWh/(m ² ·ano)	kWh/(m ² ·ano)	kWh/(m ² ·ano)
A	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_3=0,01m$	54,31	46,53	63,62	15,04
	$\delta_2=0,01m$ $\delta_3=0,15m$ $\delta_4=0,01m$	9,61	122,10	34,03	18,25
B	$\delta_1=0,01m$ $\delta_4=0,01m$	1,01	181,76	37,36	24,63
	$\delta_1=0,01m$ $\delta_4=0,02m$	33,55	28,34	39,22	9,21
	$\delta_2=0,15m$ $\delta_4=0,05m$	24,44	20,53	28,55	6,67
	$\delta_3=0,01m$ $\delta_4=0,10m$	13,57	11,32	15,83	3,68
C	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_3=0,01m$	7,75	6,44	9,04	2,08
	$\delta_1=0,01m$ $\delta_3=0,15m$ $\delta_4=0,01m$	44,39	37,33	51,86	12,03
D	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,015m$ $\delta_4=0,01m$	43,14	36,12	50,36	11,61
E	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_4=0,01m$				

4.2. Paredes com isolamento térmico em uma das superfícies

O estudo de paredes de alvenaria e emboço de argamassa com isolamento térmico do tipo poliestireno expandido foi desenvolvido considerando a montagem da camada isolante tanto na superfície externa como na superfície interna, assumindo varias espessuras conforme disponibilidade no mercado. Os seguintes valores foram considerados para caracterizar o material isolante considerado: $\rho=100 \text{ kg/m}^3$, $\lambda=0,05 \text{ W/(mK)}$ e $C=700 \text{ J/(kgK)}$. O estudo foi desenvolvido considerando duas espessuras (0,01m e 0,02m) para o isolante montado no exterior e quatro (0,01m, 0,02m, 0,05m, 0,10m) quando montado no interior.

Os resultados apresentados na Tabela 3 sugerem uma avaliação cuidadosa do uso dessa configuração em relação às condições climáticas. Devido à predominância de altas temperaturas, num determinado clima é possível que o excesso de isolamento térmico na parede aumente a demanda anual de energia para refrigeração, apesar de reduzir significativamente demanda de energia para aquecimento. Uma análise econômica e de impacto ambiental deve ser realizada por cada tipo de clima para identificar a solução ótima.

4.3. Paredes com barreira térmica com mudança de fase

Considerando os dois tipos de MMF disponíveis no mercado (Tabela 1), estudou-se efeito de barreiras térmicas em paredes de alvenaria e emboço de argamassa assumindo as configurações D e E apresentadas na Figura 2. Devido à diferença entre as temperaturas de fusão dos dois materiais, aquele com maior temperatura ($T_{MMF}=+28^{\circ}\text{C}$) é utilizado do lado externo da parede com a expectativa de limitar assim o aumento da temperatura na parede pelo excesso de energia térmica recebida por meio da radiação solar. O MMF de menor temperatura ($T_{MMF}=+24^{\circ}\text{C}$) numa camada montada do lado interno da parede, limitando assim as perdas de calor nos períodos de frio.

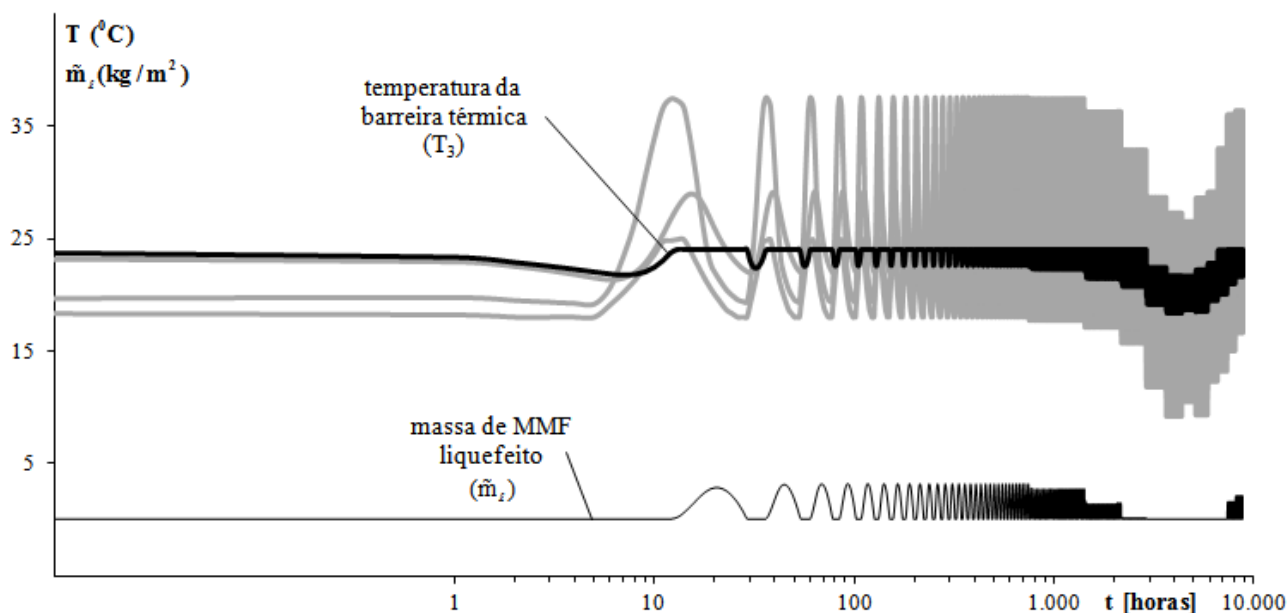


Figura 6 – Variação da temperatura de diversas camadas e da massa de MMF liquefeito na parede com barreira térmica.

Atenção especial neste caso foi dedicada ao cálculo da massa mínima de MMF necessária para o funcionamento permanente da barreira térmica com mudança de fase. Na Figura 6 pode se verificar a variação anual da temperatura de um dos MMF ($T_{MMF}=+24^{\circ}\text{C}$), utilizado como barreira térmica do lado interno da parede (numa camada de espessura $\delta_3=0,020\text{m}$), e cuja temperatura máxima não ultrapassa os 24°C . Junto à variação da temperatura do MMF está sendo representada também a variação da massa de MMF liquefeito com base na energia armazenada ou rejeitada pela barreira térmica quando ocorrem os processos de mudança de fase. Os valores mínimos da massa de MMF necessário por unidade de área de parede são de $11,75\text{ kg/m}^2$ e de $3,15\text{ kg/m}^2$, respectivamente, para MMF com $T_{MMF}=+28^{\circ}\text{C}$ e $T_{MMF}=+24^{\circ}\text{C}$. A espessura mínima da barreira térmica neste caso é de $0,014\text{ m}$ e $0,002\text{ m}$ respectivamente.

4.4. Análise dos resultados

Visando a um melhor uso dos resultados obtidos neste trabalho, na Tabela 4 são apresentadas estimativas do consumo unitário e de emissões unitárias anuais. As correlações entre os consumos unitários anuais de energia apresentados na Tabela 3 e os valores na Tabela 4 são baseadas na tarifa média de R\$ 0,35/ kWh de energia elétrica e no valor médio de $0,1355\text{ kg CO}_2/\text{ kWh}$ do fator anual de emissões divulgado pelo Ministério da Ciência e Tecnologia para 2014 (Portal MCTI).

O potencial de redução dos custos e a consequente redução das emissões são calculados em relação ao desempenho da configuração de referência (A - paredes de alvenaria e emboço de argamassa). Valores mínimos do custo e das emissões unitárias são determinados assumindo a implementação da estratégia energética apresentada neste trabalho, que prioriza emprego de ventilação (mistura) ou interação térmica (troca de calor) sempre que há possibilidade de controle e manutenção do conforto térmico pelo aproveitamento da diferença de temperatura com o ar atmosférico.

Pode ser observado na Tabela 4 pelo mínimo teórico do consumo inevitável de energia elétrica que há um grande potencial de redução de consumo e custos a ser aproveitado considerando uso de várias soluções construtivas (configurações de paredes multicamada) e operacionais (estratégias energéticas).

Tabela 4 – Custo unitário com energia elétrica e emissões unitárias anuais.

Configuração (Figura 2)		Custo R\$/ $(m^2 \cdot ano)$	Emissões kgCO ₂ / $(m^2 \cdot ano)$	Potencial redução %	Custo mínimo R\$/ $(m^2 \cdot ano)$	Emissões mínimas kgCO ₂ / $(m^2 \cdot ano)$
A $\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_3=0,01m$		22,27	8,62	Referência	5,26	2,04
B	$\delta_2=0,01m$ $\delta_3=0,15m$ $\delta_4=0,01m$	$\delta_1=0,01m$ 11,91	4,61	47	6,39	2,47
		$\delta_1=0,02m$ 13,08	5,06	41	8,62	3,34
C	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_3=0,01m$	$\delta_4=0,01m$ 13,73	5,31	38	3,22	1,25
		$\delta_4=0,02m$ 9,99	3,87	55	2,33	0,90
		$\delta_4=0,05m$ 5,54	2,14	75	1,29	0,50
		$\delta_4=0,10m$ 3,16	1,22	86	0,73	0,28
D	$\delta_1=0,01m$ $\delta_3=0,15m$ $\delta_4=0,01m$	$\delta_2=0,015m$ 18,15	7,03	18	4,21	1,63
E	$\delta_1=0,01m$ $\delta_2=0,15m$ $\delta_4=0,01m$	$\delta_3=0,020m$ 17,63	6,82	21	4,06	1,57

5. CONCLUSÕES

Levando em consideração as condições climáticas de Curitiba, Paraná, Brasil, o potencial para a redução do consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa é determinado quando se considerar dois novos materiais disponíveis no mercado para realização de barreiras térmicas no ambiente construído.

O potencial de redução do consumo de energia elétrica por unidade de área de parede foi avaliado entre 18% e 86% quando considerar o uso de camadas isolantes ou barreiras térmicas. Valores entre 61% e 97% foram calculados quando empregar simultaneamente uma estratégia energética que prioriza o emprego de ventilação ou trocadores de calor sempre que há diferença de temperatura entre o ar interno e o ar atmosférico.

Os resultados numéricos obtidos sugerem que é necessário realizar uma avaliação cuidadosa das configurações de paredes multicamadas em relação às condições climáticas. Em determinado clima, devido à predominância de altas temperaturas, é possível que o excesso de isolamento térmico na parede aumente a demanda anual de energia para refrigeração, apesar de reduzir significativamente demanda de energia para aquecimento. Para identificar a solução ótima, uma análise econômica e de impacto ambiental deve ser realizada em cada tipo de clima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CABEZA, L. F.; CASTELLÓN, C.; NOGUÉS, M. et al., Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings*, v. 39, n. 2, p. 113–119, 2007.
- CHENEY, W., KINCAID, D., *Numerical Mathematics and Computing*, Seventh Edition, Brooks/ Cole, Cengage Learning, 2014.
- CLIMATE DESIGN DATA 2009 ASHRAE HANDBOOK.
- HALFORD, C. K.; BOEHM, R. F., Modeling of phase change material peak load shifting, *Energy and Buildings*, v. 39, p. 298–305, 2007.
- PORTAL DO MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO/ MCTI, <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>, acesso em 17/04/2015.
- SARI, A., KARAIPEKLI, A., *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) 1271–1277, doi:10.1016/j.applthermaleng.2006.11.004.
- SOARES, N.; GASPAR, A. R.; SANTOS, P.; COSTA, J. J. Multi-dimensional optimization of the incorporation of PCM-drywalls in lightweight steel-framed residential buildings in different climates. *Energy and Buildings*, v. 70, p. 411–421, 2014.
- WEBSITE RGEES, LLC, URL: <http://www.rgees.com/products.php>, acesso em 14/04/2015.

AGRADECIMENTOS

Dois dos autores, GS e ALS, agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Pós-Doutorado e pelos recursos financeiros aplicados no financiamento do projeto "Novas Parcerias entre Brasil & Alemanha" / NoPa.