

## ANÁLISE DA RESPOSTA DO PROGRAMA ENERGY PLUS PARA SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE RECINTO COM MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

**Adriana Camargo de Brito (1); Elisa Morandé Sales (1); Guilherme Molnar Castro (2);  
Maria Akutsu (1)**

(1) Pesquisadora do IPT, [adrianab@ipt.br](mailto:adrianab@ipt.br), [elisams@ipt.br](mailto:elisams@ipt.br), [akutsuma@ipt.br](mailto:akutsuma@ipt.br)

(2) Estagiário de física do IPT, [gmolnar@ipt.br](mailto:gmolnar@ipt.br)

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade, São Paulo- SP, 05508-901, Tel.: (11) 3767-4579

### RESUMO

Os materiais de mudança de fase, do termo em inglês *Phase Change Materials* ou *PCMs* têm uma capacidade térmica muito superior à dos materiais construtivos convencionais, propiciada por suas alterações cíclicas de mudança de estado, que lhes permite absorver ou dissipar grande quantidade de energia térmica, na forma de calor latente. Atualmente há vários modelos matemáticos disponíveis em programas computacionais para a simulação do desempenho térmico e energético de edifícios com PCMs, como o EnergyPlus, o ESP-r e o TRNSYS. Muitos desses modelos foram validados com base em dados experimentais apresentando boa confiabilidade dos resultados. Entretanto, vários pesquisadores têm apontado fatores a serem aprimorados, tanto na modelagem do comportamento térmico desses materiais, quanto na forma de entrada de dados. Neste trabalho têm-se como objetivo verificar a similaridade entre dados referentes à resposta térmica de um recinto com e sem o uso de materiais de mudança de fase, obtidos por medições e simulações computacionais, visando identificar eventuais limitações do programa EnergyPlus na modelagem do comportamento térmico de edificações compostas por esses materiais. Os resultados apontaram que os dados medidos e simulados apresentam a mesma ordem de grandeza, indicando que o programa tem potencial para ser utilizado em estudos do desempenho térmico de edificações com PCMs.

Palavras-chave: simulação computacional, materiais de mudança de fase, desempenho térmico.

### ABSTRACT

Phase change materials or PCMs have a thermal capacity significantly higher than other building materials, due to its cyclical changes of state, which allows them to absorb or dissipate large amount of latent heat. There are several models available to simulate the thermal and energy performance of buildings with PCMs, such as EnergyPlus, ESP-r and TRNSYS. Many of these models were validated with good reliability of the results when compared to experimental data. However, several researchers have pointed out some factors that can be improved. The objective of this paper is to verify the similarity between simulated and measured data in order to identify limitations of the EnergyPlus software in modeling the thermal behavior of buildings composed of these materials. The results showed the measured and simulated data have the same order of magnitude. The EnergyPlus software has potential to be applied in assessments of the buildings thermal behavior with PCMs.

Keywords: computer simulation, phase change material, thermal performance.

## 1. INTRODUÇÃO

Os materiais de mudança de fase, do termo em inglês *Phase Change Materials* ou *PCMs*, são produtos que funcionam como “armazenadores” de energia térmica. Esses materiais têm a capacidade de apresentar alterações cíclicas de mudança de estado, absorvendo ou dissipando grande quantidade de energia térmica, o que lhes confere maior capacidade térmica por unidade de volume em comparação com materiais convencionais (BAETENS, JELLE e GUSTAVSEN, 2010; MEHLING e CABEZA, 2008). Por razões técnicas, geralmente são utilizados produtos que transitam da fase sólida para a fase líquida e vice-versa, pela maior facilidade de contenção do produto.

Nos materiais convencionais, a capacidade térmica tem contribuições do calor sensível, que é a quantidade de calor absorvido ou dissipado por um determinado material com a ocorrência de mudanças em sua temperatura. Nos PCMs a capacidade térmica tem contribuições tanto do armazenamento de calor (sensível), que ocorre nos intervalos entre as mudanças de estado, quanto do armazenamento de calor (latente), que ocorre durante essas mudanças, períodos em que a temperatura do material se mantém constante. Dessa forma, uma fina camada de PCM pode ter a mesma capacidade térmica que camadas mais espessas de outros materiais.

Os materiais de mudança de fase têm sido utilizados em diversos setores, inclusive em componentes construtivos de edificações. Geralmente, o produto é aplicado em situações em que é necessário aumentar a inércia térmica de recintos, por exemplo, aqueles compostos por sistemas construtivos leves, que em sua concepção original apresentam baixa capacidade térmica. Nesses casos, os PCMs contribuem para a obtenção de condições térmicas mais amenas no interior das edificações em relação ao ambiente exterior, podendo contribuir para a redução da necessidade de se utilizar equipamentos de climatização de ar.

Para a escolha do produto adequado a uma determinada aplicação, é necessário levar em consideração fatores como o meio de contenção ou embalagem, a repetitividade dos ciclos, a durabilidade e estabilidade do material, sua interação com o usuário e segurança. Do ponto de vista térmico, é fundamental ter informações sobre sua capacidade térmica, condutividade térmica nas fases líquida e sólida e as temperaturas do ponto de fusão e solidificação.

Atualmente há vários modelos matemáticos disponíveis em programas computacionais para a simulação do desempenho térmico e energético de edifícios com PCMs, como o EnergyPlus, o ESP-r e o TRNSYS. Muitos desses modelos foram validados com base em dados experimentais apresentando boa confiabilidade dos resultados de acordo com vários autores (TABARES-VELASCO; CHRISTENSEN; BIANCHI, 2012; TARDIEU et al., 2011; VIRGONE; JOHANNES, 2010). Entretanto, vários pesquisadores têm apontado fatores a serem aprimorados, tanto na modelagem do comportamento térmico desses materiais, quanto na forma de entrada de dados. Diante desse contexto e, considerando-se que ainda há escassas pesquisas sobre esse assunto no Brasil, no âmbito do projeto de pesquisa (em andamento), intitulado “Materiais de Mudança de Fase: potencial de uso em edificações brasileiras”, financiado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, que compreende a análise do potencial de uso de PCMs aplicados em edificações brasileiras, foi prevista uma atividade que compreende a reprodução, por simulação computacional, do comportamento térmico de um protótipo experimental com PCMs.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é verificar a similaridade entre dados referentes à resposta térmica de um recinto com materiais de mudança de fase, obtidos por medições e simulações computacionais, visando identificar eventuais limitações do programa EnergyPlus na modelagem do comportamento térmico de edificações compostas por esses materiais.

## 3. MÉTODO

Foram efetuadas simulações computacionais da resposta térmica de um protótipo de edificação contendo materiais de mudança de fase em sua envoltória, reproduzindo um experimento realizado por Kuznik e Virgone (2009) em uma câmara de testes localizada na França. No item 3.1 são apresentadas as características essenciais do programa de simulação utilizado, que proporciona a modelagem do comportamento térmico de materiais de mudança de fase e, nos itens 3.2 e 3.3, são apresentados, respectivamente, uma descrição do protótipo construído no laboratório francês e dos procedimentos executados nas simulações computacionais.

### 3.1. Programa EnergyPlus

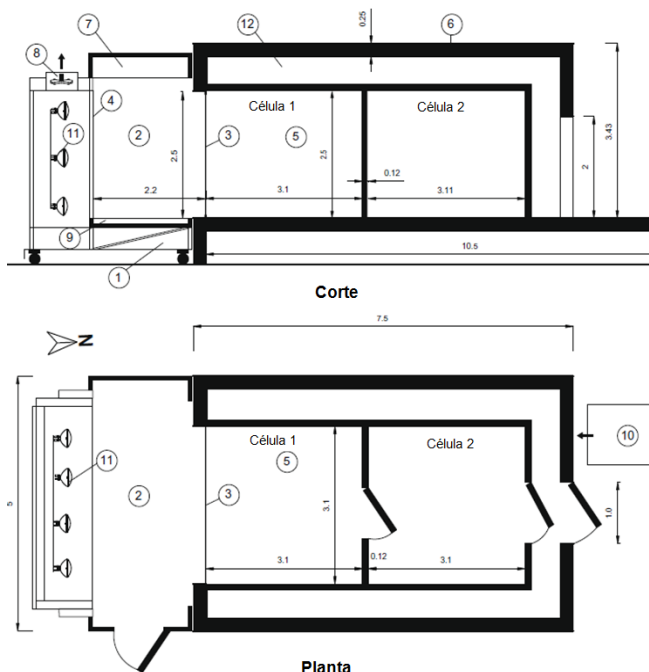
O programa EnergyPlus é um software de simulação do desempenho térmico e energético de edifícios que considera trocas de calor em regime transiente, tendo como principal algoritmo os fatores de resposta (Response Factors) para a determinação do fluxo de calor por condução nos elementos da edificação. O método dos fatores de resposta térmica (AKUTSU, 1986) supõe que as propriedades térmicas dos materiais relacionadas à sua capacidade térmica e entalpia são constantes. Entretanto, para modelar materiais de mudança de fase, essas suposições não são válidas, visto que a entalpia do material varia em função da sua temperatura (PEDERSEN, 2007). Desse modo, conforme o manual do EnergyPlus (DOE, 2015), na estrutura do programa foram acrescentados algoritmos baseados em diferenças finitas que propiciam a modelagem das propriedades térmicas variáveis de materiais de mudança de fase com base na fórmula de Crank-Nicholson.

Para simular o comportamento térmico de edifícios com PCMs no programa é necessário inserir dados referentes a um coeficiente de variação da condutividade térmica em função da temperatura e valores da entalpia do material em função da temperatura. A curva de entalpia em função da temperatura pode ser obtida por meio de técnicas de caracterização de materiais como a calorimetria de varredura diferencial (GU et al., 2008), por exemplo.

Autores como Tabares-Velasco; Christensen; Bianchi (2012), apresentaram resultados de estudos para a validação do algoritmo do programa EnergyPlus para modelagem do comportamento de materiais de mudança de fase, seguindo o procedimento 140 da ASHRAE para avaliação de programas de análise energética de edifícios (ASHRAE, 2004). Os autores concluíram que a versão 6.0 apresenta problemas em seu algoritmo, relacionados à variação da condutividade térmica, e que por consequência dá origem a resultados que não estão em conformidade com os experimentos. Esses problemas foram corrigidos a partir da versão 7.1. A atual versão do EnergyPlus 8.1 inclui o referido modelo corrigido e validado.

### 3.2. Protótipo com materiais de mudança de fase

O protótipo francês é composto por duas células de teste (Figura 1), uma câmara climática e um simulador solar (Figuras 2 e 3). Este trabalho foi utilizado como referência em virtude da disponibilidade de todos os dados necessários à reprodução do experimento, ou seja, são apresentados detalhes tanto do protótipo quanto das condições térmicas de exposição. Outros trabalhos analisados não apresentam todas essas informações, dificultando ou impossibilitando a sua reprodução.



**Legenda:**

1. Ar condicionado; 2. Câmara climática; 3. Vidro simples; 4. Pano de vidro de proteção do simulador solar; 5. Célula de teste; 6. Concreto; 7. Plenum; 8. Ventilador; 9. Retorno; 10. Unidade de ar condicionado; 11. Simulador solar; 12. Envoltória das células de teste.

Figura 1 – Projeto da câmara de testes (KUZNIK E VIRGONE, 2009).

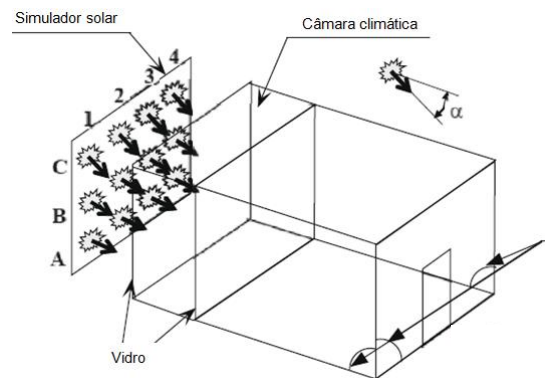


Figura 2 – Simulador solar (KUZNIK E VIRGONE, 2009).

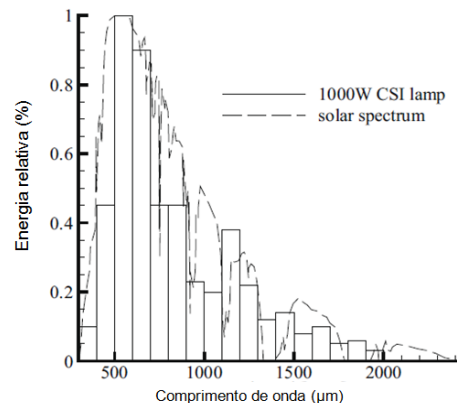


Figura 3 – Espectro solar reproduzido pelas lâmpadas (KUZNIK E VIRGONE, 2009).

### 3.2.1 Câmara climática e simulador solar

A câmara climática propicia uma variação da temperatura do ar entre  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , podendo ser controlada de modo dinâmico. Nesse recinto são utilizados ventiladores para minimizar o efeito de estratificação das temperaturas do ar. A câmara é acoplada a um simulador solar, composto por doze lâmpadas de descarga de gás, com potência de 1000 W, que reproduzem o espectro solar (Figura 3). As lâmpadas são distribuídas em três linhas de quatro lâmpadas (Figura 2), indicadas, respectivamente, como A, B e C da referida figura, com inclinação de  $0^{\circ}$ ,  $25^{\circ}$  e  $50^{\circ}$ .

O simulador solar foi ajustado de modo que a radiação incidente na fachada da célula teste proporcione os valores horários dessa grandeza apresentados na Figura 4. No estudo considerou-se que, em um dia de verão, os valores das temperaturas mínima e máxima do ar nesse recinto variam entre  $15$  e  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Observa-se que o dia de verão considerado no experimento se inicia às zero horas com a temperatura do ar igual a  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , como indicado na Figura 5, não correspondendo aos horários de um dia real em que seria obtida esta temperatura do ar exterior.

O ar no interior da envoltória das células de teste (item 12 da Figura 1), que está em contato com a superfície externa de paredes e piso das células, é mantido em uma temperatura constante e igual a  $20,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Durante a noite ( $18\text{-}6\text{ h}$ ) as células de teste são ventiladas a uma taxa de  $3,8\text{ Ren/h}$  (Renovações do volume de ar do ambiente por hora), com ar proveniente da câmara climática com variação na sua temperatura entre  $15$  e  $22,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

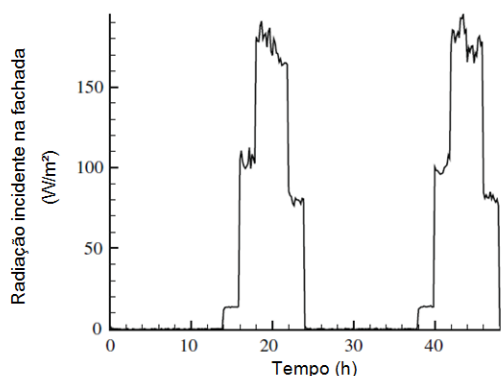


Figura 4 – Radiação solar incidente perpendicularmente à fachada de vidro da célula de testes 1 (Kuznik & Virgone, 2009)

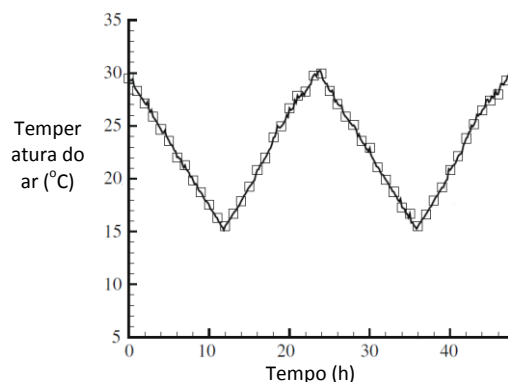


Figura 5 – Temperatura do ar exterior à célula de testes 1 (câmara climática) (Kuznik & Virgone, 2009)

### 3.2.2 Componentes construtivos

Os componentes construtivos do protótipo e as propriedades térmicas dos materiais utilizados são indicados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Composição das paredes, piso e teto do protótipo (Kuznik & Virgone, 2009)

Componente	Material	Espessura (mm)
Piso	Concreto	200
Parede	Gesso	10
	Poliestireno expandido	50
	Gesso	10
	Placa de madeira (face externa)	50
Teto	Gesso	10
	Placa de madeira	8
	Isolante térmico	55
	Placa de madeira (face externa)	25
Fachada	Vidro	10

Tabela 2 – Características térmicas dos materiais do protótipo (Kuznik & Virgone, 2009)

	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Capacidade térmica (J/kg.K)	Condutividade térmica (W/m.K)
Concreto	400	919,5	0,160
Gesso	817	1620	0,350
Placa de madeira	544	1640	0,136
Poliestireno expandido	35	1210	0,040
Isolante térmico	200	362,8	0,060
Vidro	2500	770	1

### 3.2.3 Material de mudança de fase

O protótipo foi analisado com e sem o uso do Material *Energain*, produzido pela empresa *Dupond de Nemours Society*. Este produto consiste em uma folha flexível com 5 mm de espessura e massa específica da ordem de 900 kg/m<sup>3</sup> constituída por parafinas e polímeros micro encapsulados com ponto de fusão da ordem de 22 °C. A condutividade térmica do material é igual a 0,18 W/(m<sup>2</sup>.K) na fase sólida e 0,22 W/m<sup>2</sup>.K na fase líquida. Maiores detalhes das características térmicas desse produto, incluindo curvas de fusão e de solidificação do material em função da temperatura, podem ser encontradas em Kuznik & Virgone (2009). A curva de entalpia do produto, obtida de Cao; Gustavsen; Uvsløkk (2010) é apresentada na Figura 6. Esse material foi adicionado a três paredes internas da célula de testes 1, posicionado entre a camada de gesso acartonado e a camada de poliestireno expandido, como indicado na Figura 7.

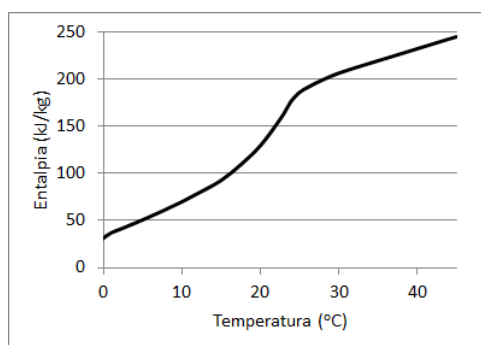
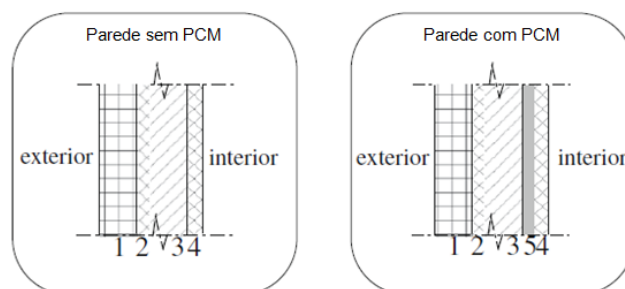


Figura 6 – Entalpia em função da temperatura do painel com PCM *Energain* (CAO; GUSTAVSEN; UVSLØKK, 2010)



1. Placa de madeira; 2. Gesso; 3. Poliestireno; 4. Gesso; 5. PCM

Figura 7 – Paredes com e sem PCM (Kuznik & Virgone, 2009)

### 3.2.4 Medições

Os autores efetuaram medições das temperaturas do ar no interior da célula de testes 1, bem como das temperaturas superficiais das faces interna e externa das paredes com o uso de termopares com precisão de 0,4 °C. Foram considerados dois pontos de medição da temperatura do ar, posicionados no centro da sala em duas alturas, o primeiro à uma distância de 0,85 m do piso e o segundo, 1,70 m para verificar a estratificação de temperaturas do ar. A radiação incidente na fachada de vidro da célula 1 foi medida com um piranômetro. Os dados foram medidos de 10 em 10 minutos durante três dias, apresentando-se os resultados dos últimos dois dias de medições. Foram analisados os resultados obtidos na célula de teste 1.

## 3.3 Simulações Computacionais

As duas células de testes foram simuladas com as dimensões e características construtivas dos recintos reais descritas no item 3.2, cada qual considerada como uma zona térmica, com uma parede em comum (Figura 8). A única parede externa é aquela que contém o vidro (célula 1). As demais paredes, piso e teto são voltados a ambientes internos, mantidos a uma temperatura constante de 20,5 °C, assim como ocorre no protótipo original.

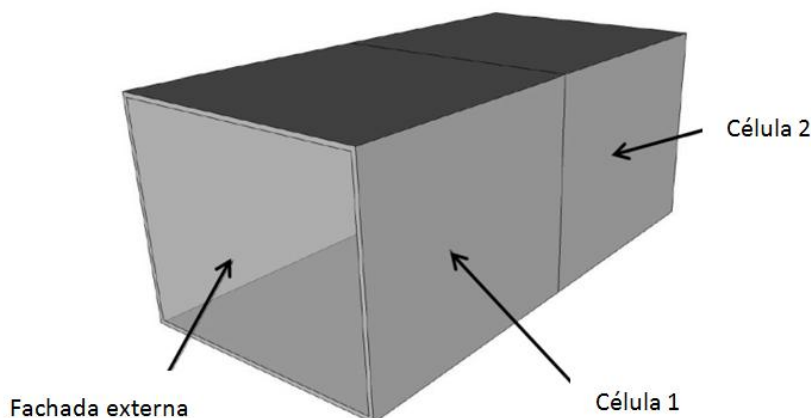


Figura 8 – Célula de testes

### 3.3.1 Condições de exposição ao clima

Devido a limitações do programa de simulação, não seria possível reproduzir as características exatas do simulador solar com as doze lâmpadas e suas respectivas inclinações. Dessa forma, foram inseridos dados climáticos de uma cidade fictícia, adaptados de modo a representar condições térmicas similares às da câmara climática do protótipo original. Os dados referentes às temperaturas do ar externo e à radiação incidente na fachada da câmara apresentam a mesma ordem de grandeza daqueles apresentados no protótipo.

Nas Figuras 9 e 10 são apresentados, respectivamente, os perfis horários da temperatura do ar exterior e da radiação incidente na fachada, considerados no protótipo e nas simulações. Observa-se que há uma defasagem entre os perfis das grandezas medidas e simuladas, o que não afeta os resultados das análises.

### 3.3.2 Modelagem dos materiais de mudança de fase

Os materiais de mudança de fase foram simulados de acordo com as suas características térmicas indicadas no item 3.2.3, especialmente quanto à sua entalpia em função da temperatura (Figura 6). Foi utilizado o algoritmo de diferenças finitas, com intervalo de cálculo a cada 1 minuto, para maior precisão dos resultados.

### 3.3.2 Ventilação dos recintos

Quanto à ventilação dos recintos, como as condições térmicas consideradas nas simulações não são controladas da mesma forma como ocorre no protótipo real, foi feito um ajuste na taxa de ventilação das células simuladas, para compensar a perda de calor que ocorre para o fundo de céu no período noturno, o que não acontece no protótipo original. Isso pode ser observado na Figura 11, que indica a temperatura superficial externa da fachada em relação à temperatura do ar exterior.

Na referida figura, a temperatura superficial mínima da fachada está abaixo da temperatura mínima do ar exterior, de modo que as células simuladas precisam de uma taxa de ventilação noturna menor do que a considerada no protótipo original para alcançar condições térmicas semelhantes a ele. As células simuladas são ventiladas das 18 às 6 h, a uma taxa de 1 Ren/h (renovação do volume de ar do ambiente por hora), enquanto no protótipo original essa taxa é de 3,8 Ren/h.

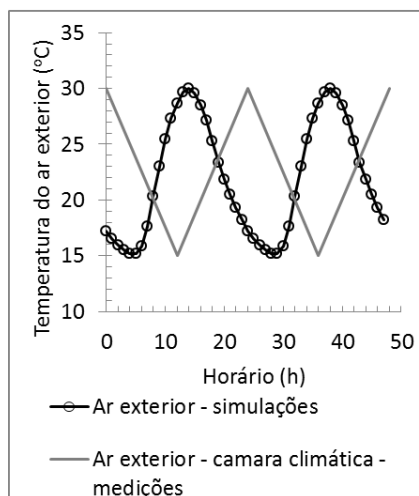


Figura 9 – Temperatura do ar exterior à célula de testes 1 (simulações e medições)

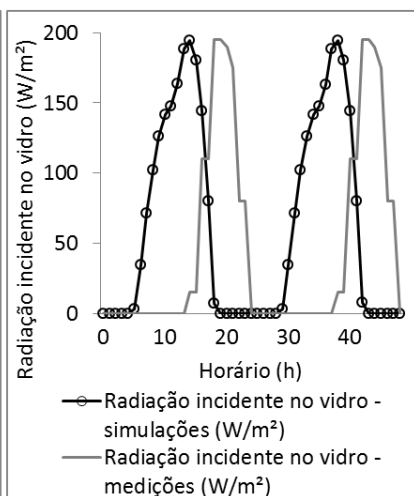


Figura 10 – Radiação solar incidente perpendicularmente à fachada de vidro da célula 1 (simulações e medições)

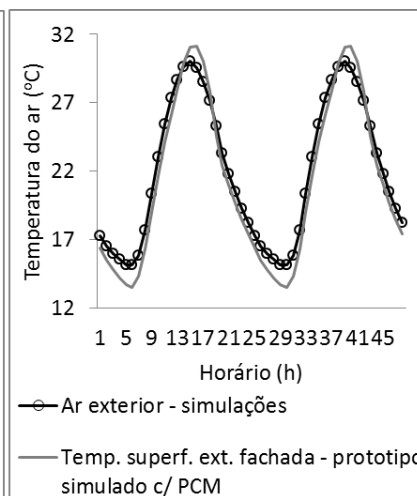


Figura 11 – Temperatura superficial externa da fachada e temperatura do ar exterior obtida nas simulações

#### 4. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados das simulações e das medições realizadas no protótipo. As temperaturas do ar interior da célula 1 com e sem PCMs são indicadas nas Figuras 12 e 13. As temperaturas superficiais internas da parede divisória entre as células 1 e 2 são indicadas nas Figuras 14 e 15.

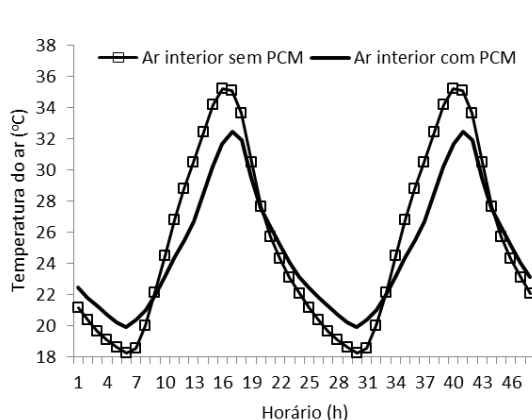


Figura 12 – Temperatura do ar interior nas simulações

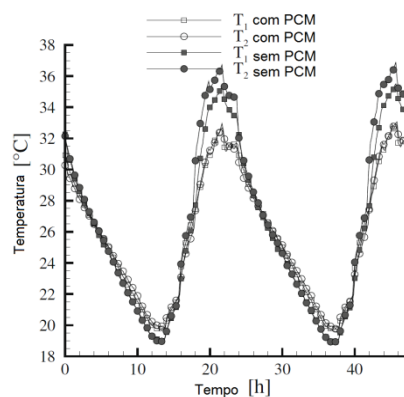


Figura 13 – Temperatura do ar interior nas medições (Kuznik & Virgone, 2009)

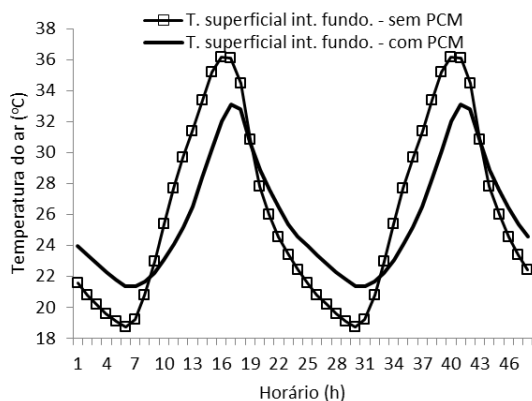


Figura 14 - Temperatura superficial da parede do fundo da câmara 1, divisória entre as células 1 e 2, nas simulações

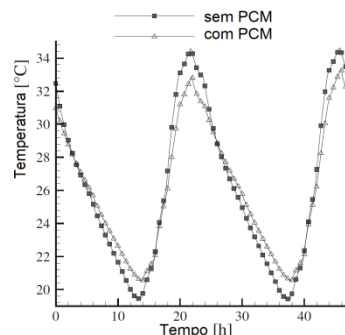


Figura 15 – Temperatura superficial da parede do fundo da câmara 1, divisória entre as células 1 e 2, nas medições (Kuznik & Virgone, 2009)

Observa-se que, para facilitar comparações visuais dos resultados obtidos, quanto aos dados simulados e medidos, nos gráficos indicados nas Figuras 12 e 13, as escalas numéricas dos eixos das ordenadas, que indicam a temperatura, foram ajustadas para que os valores numéricos sejam correspondentes. O mesmo procedimento foi efetuado nas Figuras 14 e 15.

#### 4.1 Temperatura do ar interior

Com base nas Figuras 12 e 13, observa-se que, sem PCMs nas paredes há uma diferença da ordem de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre os valores da temperatura máxima do ar interior medido ( $35,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e simulado ( $35,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Essa diferença não é significativa, além de estar dentro da faixa de precisão de equipamentos de medição.

Tratando-se da temperatura mínima do ar interior observa-se uma diferença da ordem de  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre os valores medido ( $18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e calculado ( $18,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Nesse caso, embora a diferença seja mais significativa, ainda pode ser considerada aceitável, visto que apresentam a mesma ordem de grandeza.

Com PCMs nas paredes a diferença entre o valor máximo da temperatura do ar interior medido e simulado é da ordem de  $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  e, quanto ao valor mínimo da temperatura do ar, a diferença é de  $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nessa situação não há diferenças significativas entre os valores medidos e simulados.

#### 4.2 Temperatura superficial de paredes

Foram observadas diferenças significativas entre os valores medidos e simulados das temperaturas superficiais das paredes internas. Nas paredes sem PCMs há uma diferença da ordem de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  no valor da temperatura máxima superficial das paredes, como indicado nas Figuras 14 e 15, na parede divisória entre as células de teste. O valor da temperatura máxima superficial dessa paredes é igual a  $34,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , conforme dados medidos e  $36,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , de acordo com os dados obtidos nas simulações. Essa tendência se repete quanto ao valor da temperatura mínima superficial, com diferença de  $1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre valores medidos e simulados ( $19,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  medido e  $18,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  simulado). Na célula com PCM, a diferença entre os valores medidos e simulados da temperatura superficial é da ordem de  $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Estes resultados podem ser explicados por meio das limitações da ferramenta de simulação computacional utilizada. Nas simulações não são reproduzidas com exatidão as condições térmicas do protótipo real, especificamente quanto às trocas térmicas por convecção que influenciam substancialmente o valor da temperatura superficial das vedações. Entretanto, como neste caso as trocas térmicas majoritárias ocorrem por radiação, este fenômeno, observado nas temperaturas superficiais, não afeta de modo significativo a temperatura do ar interior, que representa a resposta térmica do ambiente e apresentou valores medidos e simulados, como indicado no item 4.1.

### 5. CONCLUSÕES

A resposta térmica da célula 1, obtida por simulações computacionais com o programa EnergyPlus, apresenta a mesma ordem de grandeza da resposta térmica deste ambiente obtida por meio de medições realizadas e apresentadas por Kuznik e Virgone (2009), seja com ou sem o uso de PCMs nas paredes.

Com o programa EnergyPlus não foi possível reproduzir, com exatidão, a câmara climática construída no laboratório francês, em decorrência de limitações do programa. Ressalta-se que tais limitações não se referem à capacidade do EnergyPlus em modelar o comportamento térmico dos materiais de mudança de fase, mas sim, às próprias características físicas da câmara original, como o detalhamento do simulador solar. Além disso, nas simulações é considerado um dia com características de um dia real, em que há perdas de calor para o fundo de céu no período noturno que não acontecem no protótipo original. Mesmo diante dessas dificuldades, que resultaram em adaptações nos dados de entrada, os dados simulados são similares aos dados medidos.

Esses resultados indicam que o programa tem potencial para ser utilizado em estudos do desempenho térmico de edificações com este material. A realização de simulações da resposta térmica de edificações com e sem PCMs por meio do programa EnergyPlus mostrou-se promissora para o estudo de características térmicas de materiais de mudança de fase que possam proporcionar a melhoria do desempenho térmico de edificações.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **STANDARD 55-2010**: Thermal environmental conditions for human occupancy, Atlanta, 2010.
- BAETENS, R.; JELLE, B. P.; GUSTAVSEN, A. Phase change materials for building applications: A state-of-the-art review. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 9, p. 1361–1368, set. 2010.
- CAO, S.; GUSTAVSEN, A.; UVSLØKK, S. The Effect of Wall-Integrated Phase Change Material Panels on the Indoor Air and Wall Temperature – Hot box Experiments. In: Renewable Energy Conference, 2010, Trondheim. **Proceedings...** Trondheim, 2010, p. 15–26.
- DOE – U. S. DEPARTMENT OF ENERGY. Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California **EnergyPlus EngineeringReference: The Reference to EnergyPlus Calculations**. California, 2013.
- GU, E.; MEHLING, H.; HIEBLER, S.; CABEZA, L. F.; Determination of the enthalpy of PCM as a function of temperature using a heat-flux DSC - A study of different measurement procedures and their accuracy. **International Journal of Energy Research**, v.32, p. 1258–1265, 2008.
- KUZNIK, F.; VIRGONE, J. Experimental assessment of a phase change material for wall building use. **Applied Energy**. v. 86, n. 10, p. 2038–2046, 2009.
- MEHLING, H.; CABEZA, L. F. **Heat and cold storage with PCM: An Up to Date Introduction into Basics and Applications**. Berlin: Springer, 2008, p. 308.
- PEDERSEN, C. O. Advanced zone simulation in EnergyPlus : incorporation of variable properties and phase change material (PCM) capability. In: BUILDING SIMULATION, 2007, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IBPSA, 2007, p. 1341–1345.
- TABARES; VELASCO, P. C.; CHRISTENSEN, C.; BIANCHI, M. Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies. **Building and Environment**, v. 54, p. 186–196, 2012.
- TARDIEU, A. Computer simulation and experimental measurements for an experimental PCM-impregnated office building. In: BUILDING SIMULATION, 2011, Sydney. **Proceedings...** Sydney: IBPSA, 2011, p.56-63.
- VIRGONE, J.; JOHANNES, K. Development and validation of a new TRNSYS type for the simulation of external building walls containing PCM. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1004–1009, 2010.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo apoio e o financiamento do projeto de pesquisa intitulado “Materiais de Mudança de Fase: potencial de uso em edificações brasileiras”, da qual esta publicação é parte integrante.