



METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DE SISTEMAS NÃO-CONVENCIONAIS DE PAREDES DE VEDAÇÃO ATRAVÉS DE MONITORAMENTO EM *TEST-CELLS* E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Márcio H. Komeno (1); Rosa M. Sposto (2); Eduardo L. Krüger (3)

(1) Mestre - Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC – Universidade de Brasília, Brasília – e-mail: marciohk@unb.br

(2) Programa de pós-graduação em Estruturas e Construção Civil – PECC – Universidade de Brasília, Brasília – e-mail: rmsposto@unb.br

(3) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná , Curitiba – e-mail: krueger@ppgte.cefetpr.br

RESUMO

O uso de simulação computacional representa um recurso interessante, muitas vezes rápido e econômico na determinação de temperatura interna e avaliação do desempenho térmico de edificações, porém muitas vezes não substituindo a avaliação através de medições *in loco*. O uso de protótipos em escala reduzida (*test-cells*) pode representar uma alternativa de menor custo na avaliação de novos componentes e subsistemas para edificações, dos quais não se tem conhecimento prévio sobre suas características térmicas. O objetivo da pesquisa consistiu na avaliação de desempenho térmico de um subsistema, composto por paredes de blocos de concreto com enchimento de entulho, a partir de monitoramento em protótipos em escala reduzida e simulação computacional. Como metodologia, adotaram-se os seguintes passos: 1) construção de *test-cells* e elaboração de um programa experimental, o qual consistiu do monitoramento da temperatura interna de 3 *test-cells*, sendo a primeira de paredes compostas de blocos vazados de concreto, a segunda de blocos vazados de concreto com preenchimento de entulho da construção civil, e a terceira de blocos vazados de concreto com preenchimento de entulho, revestidos externamente de reboco; 2) criação e calibração de um modelo computacional a partir do software COMFIE, verificando-se grau de correlação e desvio padrão encontrados entre dados medidos e resultados de simulação; 3) aplicação das configurações utilizadas nas paredes do modelo computacional a uma habitação padrão popular, simulação e análise de resultados; e 4) propostas de melhorias no projeto de habitação. Os resultados das simulações apresentaram a redução da temperatura interna com o enchimento de entulho nos furos dos blocos, resultando em um melhor desempenho térmico de habitações de interesse social sem a utilização de materiais nobres e criando uma aplicação alternativa para os resíduos de construção civil.

Palavras-chave: reaproveitamento de materiais; *test-cells*; avaliação de desempenho térmico.

ABSTRACT

The use of computer simulations for evaluating thermal performance of buildings may not always replace on site monitoring of a given building. Testing new systems and components, whose overall thermal characteristics are unknown, by means of using test-cells may configure therefore a low-cost approach for this kind of evaluation. This study aimed to analyze a subsystem, composed by concrete masonry walls, filled with rubble, through on site monitoring and computer simulations. The method consisted of the following steps: 1) assembling and monitoring 3 test-cells, the first one

built with hollow concrete blocks as wall material, the second one with concrete blocks with rubble as filling material and the third one built with plastered concrete with rubble; 2) simulation and validation of a numerical model of the test-cell, by means of direct comparison and statistical analysis; 3) consideration of the same configurations adopted in the test-cells for a low-cost house, simulation and result analysis; 4) optimization proposals for the given house. An improvement in thermal performance was verified with the increase of thermal mass, suggesting a new possibility of using waste materials instead of cost-intensive materials.

Keywords: reutilization of building materials; test-cells; thermal performance.

1 INTRODUÇÃO

Tendo em vista a necessidade da melhoria do conforto térmico em habitações de interesse social, devido ao freqüente desempenho insatisfatório dos sistemas construtivos empregados e ao maior consumo energético para o seu condicionamento térmico, muitas pesquisas têm sido realizadas na área de novos materiais e componentes para paredes e coberturas, incluindo-se o acoplamento de materiais como isolantes térmicos e até mesmo resíduos.

De acordo com o projeto de norma ABNT NBR 02:136.01.001 (2004), a avaliação de desempenho térmico de habitações pode ser realizada pelo processo simplificado, por simulação, ou por meio de medição *in loco*, que apesar de apresentar um custo relativamente grande na construção de protótipos em escala real, traduz melhor o comportamento real do sistema construtivo.

Como forma alternativa de maior facilidade de comparação de materiais e de menor custo de construção, comparativamente às habitações, podem ser considerados modelos reduzidos ou *test-cells*, objeto de estudos anteriores como Cheng et al. (2003) e Krüger et al. (2004), dentre outros.

O presente trabalho sugere a utilização destes protótipos em escala reduzida para a avaliação de novos componentes e subsistemas para edificações, dos quais não se tem conhecimento prévio sobre suas características térmicas, como é o caso de **paredes de blocos de concreto com enchimento de entulho**. A partir dos dados de monitoramento das células, foram criados e calibrados os dados de entrada de um modelo computacional, verificando-se o grau de correlação e desvio padrão encontrados com os resultados de simulação. As temperaturas internas de uma habitação padrão popular foram então determinadas a partir das calibrações anteriores.

Quanto à proposta de enchimento dos furos dos blocos de concreto com entulho, esta se deve a recomendações propostas pela norma da ABNT NBR 15.220-3 (2005) para habitações unifamiliares no clima de Brasília (Tropical de altitude): **paredes pesadas e coberturas leves e isoladas**. O intuito foi de analisar o efeito térmico do aumento da inércia das paredes com o uso de resíduos, além de criar uma destinação adequada para o material que normalmente é descartado, contribuindo ainda com a melhoria do desempenho térmico de habitações.

2 METODOLOGIA

2.1 Construção de *test-cells*

Para a realização dos estudos, foram construídas três *test-cells*, de dimensões internas de 1m×1m×1m, no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, da Universidade de Brasília, em área reservada para estudos das áreas de Tecnologia ambiental e de Sistemas construtivos e materiais.

As *test-cells* foram construídas sobre uma base de concreto armado de 10cm, com cobertura de telha de fibrocimento de 6mm, de dimensões de 1,50m×1,50m. Sob a cobertura, foi utilizado

também um isolante térmico de lã de vidro, com 5cm de espessura. A orientação solar é o eixo leste-oeste, com as paredes voltadas para o norte verdadeiro.

As *test-cells* são apresentadas na Figura 1, e as características das paredes encontram-se descritas a seguir:

Test-cell 1 (TC1): Parede de bloco de concreto de 9cm, aparente e sem enchimento interno dos furos;

Test-cell 2 (TC2): Parede de bloco de concreto de 9cm, aparente e com enchimento interno dos furos com entulho;

Test-cell 3 (TC3): Parede de bloco de concreto de 9cm, com revestimento e com enchimento interno dos furos com entulho.

O entulho é proveniente do trituração e peneiramento de placas de passeios públicos e tubos de águas pluviais (constituído basicamente por concreto) e foi fornecido pela Companhia Urbanizadora da Nova Capital do Brasil - NOVACAP. Na Figura 2, pode-se visualizar o enchimento dos furos dos blocos de concreto com entulho, realizado à medida que as fiadas das células eram construídas.



Figura 1: *Test-cells* construídas na Universidade de Brasília.



Figura 2: Enchimento dos furos dos blocos de concreto da *test-cell* com entulho.

Considerou-se também no estudo a influência da pintura externa (branca e cinza: cor original do bloco de concreto) para as *test-cells*, sendo que a pintura dos blocos foi realizada com tinta acrílica, com 3 demãos, devido à alta porosidade dos blocos de concreto.

3.2 Monitoramento

Para realizar o monitoramento das células foram utilizados 3 (três) aparelhos termohigrógrafos (marca Fischer), dispostos no seu interior e localizados à meia-altura das células. Para os resultados apresentados neste trabalho, foram considerados dados de monitoramento realizado no período do verão, conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Período de Monitoramento das *test-cells*

Série de Medição	Estação do ano	Pintura	Período
01	Verão	Branca	29/01/05 a 11/02/05
02	Verão	Cinza	20/02/05 a 05/03/05

Para otimizar a aquisição dos dados monitorados pelos termohigrógrafos de temperatura, foi utilizado um processo de digitalização das leituras dos diagramas dos aparelhos (transformação dos diagramas climáticos analógicos dos termohigrógrafos em séries numéricas). A metodologia utilizada foi a descrita por Pereira (2004), e consiste em escanear o diagrama com os dados monitorados (leituras de temperatura do interior da *test-cell*), e utilizar o Autocad® para obtenção das coordenadas das curvas após a realização do traçado de uma “polyline” sobreposta à curva do diagrama. Os dados adquiridos foram então corrigidos e interpolados para se obterem as temperaturas nos horários desejados (intervalo de 15 em 15 minutos).

3.3 Programa experimental

Após a construção das *test-cells* foi determinado um programa experimental para a realização das demais etapas do estudo. O fluxograma a seguir apresenta o resumo de todas as etapas da pesquisa: construção das células, monitoramento, calibração de dados de entrada e simulação de uma habitação com as mesmas características de paredes do protótipo, conforme a Figura 3.

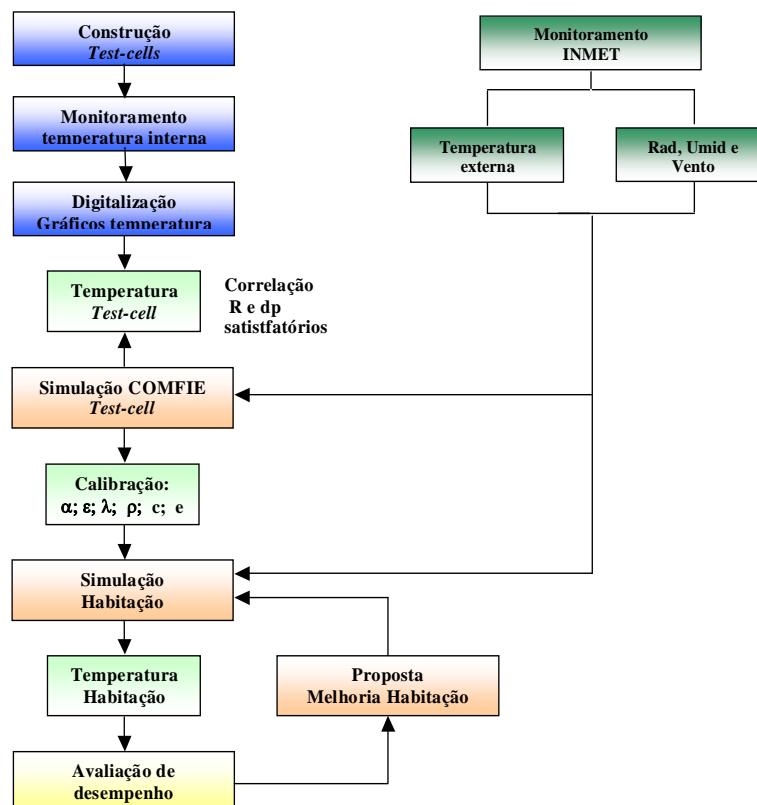


Figura 3: Fluxograma do Programa Experimental

As etapas de simulação das *test-cells* consistiram, primeiro, na calibração dos dados de entrada do software, com o intuito de se obter boa correlação com os dados de temperatura monitorados nas células. Após a calibração, foram realizadas simulações de uma habitação padrão com o mesmo subsistemas de paredes em estudo, avaliando-se o seu desempenho térmico conforme classificação do projeto de norma ABNT NBR 02:136.01.001 (2004). Em virtude dos resultados encontrados, foram realizadas simulações com propostas de melhoria na habitação.

4 CALIBRAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PARA AS TEST-CELLS

Primeiramente foram realizadas calibrações dos dados de entrada do software, comparando-se os dados monitorados com os resultados dos dados simulados das células no software. Esta calibração consistiu na entrada de dados geométricos das células e orientações das paredes, bem como dados de espessura e das propriedades dos seus materiais constituintes (densidade (ρ), condutividade (λ) e calor específico (c), provenientes da norma ABNT NBR 15220-2). Em virtude da não possibilidade de se realizar ensaios experimentais, foram adotados os valores das propriedades térmicas citadas em norma.

Durante as simulações, foram alterados também os valores de absorância (α) e emissividade (ϵ) das paredes e cobertura, além de se realizar pequenas variações de espessura dos componentes de parede, de forma que a correlação entre os resultados simulados se aproximasse ao máximo dos resultados monitorados. Quanto aos dados climáticos utilizados, estes foram adquiridos do INMET e são correspondentes ao respectivo período de monitoramento dos protótipos.

Na Figura 4, é apresentada a sobreposição das curvas de temperatura dos dados simulados para a TC1 e dos dados obtidos por meio de monitoramento *in loco* da respectiva célula durante o período de verão, com paredes na cor cinza. Os valores de absorância (α) e emissividade (ϵ) considerados na simulação foram de 0,4 e 0,9, respectivamente.

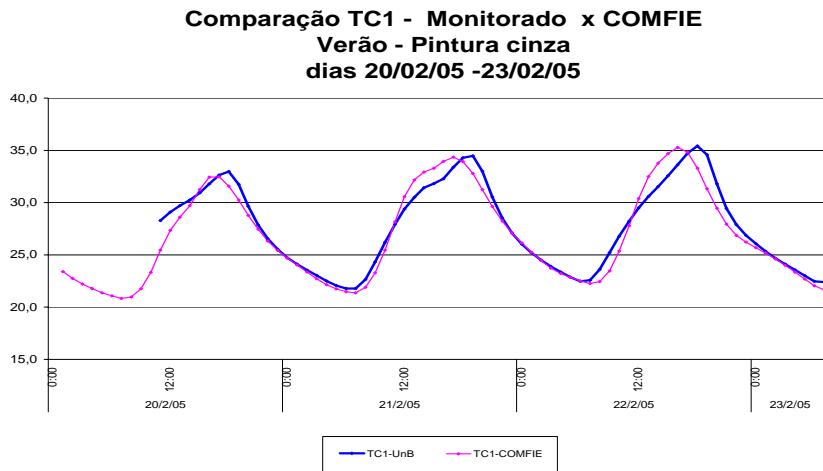


Figura 4 – Comparação entre resultados de monitoramento de TC1 e de simulação com o COMFIE – Verão (20/02/05 a 23/02/05) – Cor cinza

Verifica-se certa proximidade dos dados da temperatura simulada, com exceção do terceiro dia, em que a curva simulada deslocou-se da curva real. A comparação entre as curvas simuladas e monitoradas foi realizada por meio de análise da dispersão, através do coeficiente de correlação (R) e do desvio padrão (dp), conforme apresentado na Figura 5.

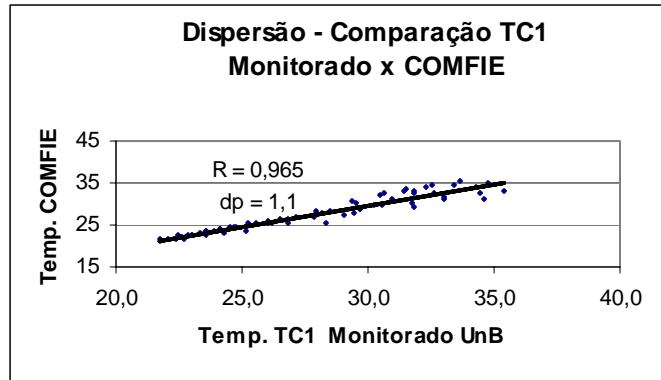


Figura 5 – Dispersão – resultados de medição de TC1 e de simulação com o COMFIE – Verão (20/02/05 a 23/02/05) – Pintura cinza

Os dados das espessuras e das propriedades dos materiais de parede da *test-cell* 1, que apresentaram melhor correlação entre os dados simulados e monitorados estão presentes nas Tabela 2 (dados de referência da norma ABNT NBR 15.220-2 , 2005).

Tabela 2 – Propriedades térmicas das paredes

<i>Test-cell</i>	Composição	Espessura (cm)	λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	c (Wh/kg/K)
TC1	Concreto	3,0	1,75	2200	0,28
	Ar	3,0	0,40	1,0	0,34
	Concreto	3,0	1,75	2200	0,28

O mesmo tipo de análise foi realizado para as células TC2 e TC3. A tabela 3 contém os valores de R e desvio padrão encontrados.

**Tabela 3 – Coeficientes de correlação (R) e desvio padrão (dp)
Comparação *test-cells* monitoradas vs. COMFIE (20/02/05 a 27/02/05)**

<i>Test-cell</i>	R	dp
TC1	0,965	1,1
TC2	0,959	1,1
TC3	0,925	1,1

A comparação estatística evidenciou uma boa correlação entre os resultados das simulações com os dados obtidos por meio de monitoramento. Nas comparações entre os resultados monitorados e simulados para as células, verificou-se satisfatoriedade dos coeficientes de correlação, apesar do valor obtido para o desvio padrão ser de aproximadamente 1,1 para todas as células, na estação de verão com paredes na cor cinza.

5 SIMULAÇÃO DE UMA HABITAÇÃO PADRÃO POPULAR

5.1 Aplicação das configurações utilizadas nas paredes do modelo computacional

Com o intuito de avaliar o desempenho dos subsistemas de paredes propostos para as *test-cells* em escala real, foram realizadas simulações com uma habitação de referência, objeto de estudo sobre avaliação de desempenho térmico realizado por Michaloski (2002).

A habitação possui 39,50m² de área construída, pé-direito de 2,70m e está localizada na Vila Tecnológica de Curitiba. Esta faz parte da meta do PROTECH (Programa de Difusão de Tecnologia para construção de Habitação de Baixo Custo) e está representada na Figura 6.



Figura 6 – Croqui da habitação adotada para simulação do cômodo padrão
Fonte: MICHALOSKI (2002).

Foram utilizados como dados de entrada os valores previamente calibrados por Michaloski para o COMFIE a partir de monitoramento *in loco*. Para os dados de entrada da simulação, foram inseridos: características físicas da habitação (dimensões e descrição das zonas), características dos elementos construtivos e dados climáticos do período de monitoramento das células.

Na Figura 7, são apresentadas as temperaturas internas para as duas zonas consideradas: zona interior da habitação e ático com a alternativa de parede da célula TC1, com parede na cor cinza. As simulações foram realizadas de acordo com especificações do projeto de norma ABNT NBR 02:136.01.001 (2004), com ventilação de 1ren/h e sem uso de equipamentos ou pessoas. Foram verificadas elevadas temperaturas internas para HAB-TC1, com temperaturas máximas sempre superiores à máxima externa e superiores a 29°C, sendo que em função disto, a habitação não se classificou com um nível de desempenho mínimo M.

Pode-se observar na figura também as altas temperaturas da zona do ático, atingindo até 40,2°C no dia 22/02/05. As temperaturas máximas internas alcançaram também valores elevados, sendo estas: 32,9°C, 35,2°C e 36,6°C nos 1º, 2º e 3º dias, respectivamente.

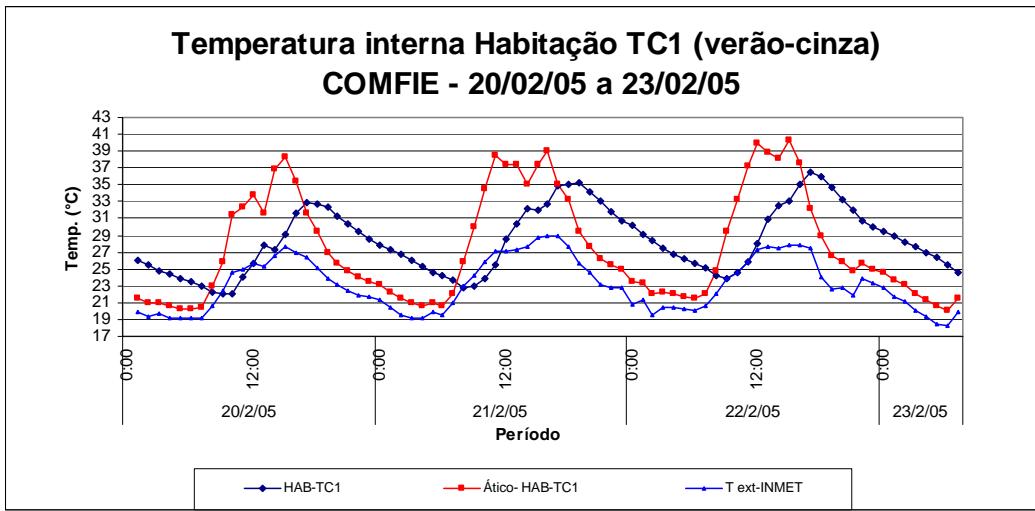


Figura 7 – Simulação da Habitação empregando-se as mesmas alternativas de parede utilizadas para TC1 – 1ren/h e sem ocupação – Verão– Pintura cinza

Na Figura 8, são comparadas as temperaturas da habitação simulada com os três tipos de paredes das células testes. Pode-se visualizar que a alternativa de parede para HAB-TC2 não representou grandes modificações na redução das temperaturas máximas, sendo a temperatura máxima para paredes com cor cinza, na estação de verão e taxa de renovação 1ren/h, igual a 35,9°C para o 3º dia. Para HAB-TC3, a diferença entre a temperatura interna e externa é de aproximadamente 6,8K, sendo a temperatura máxima no 3º dia igual a 34,7°C. O uso dos materiais de baixa inércia para a cobertura pode ser responsável por este baixo desempenho térmico da habitação, assim como o baixo valor da taxa de renovação (1ren/h).

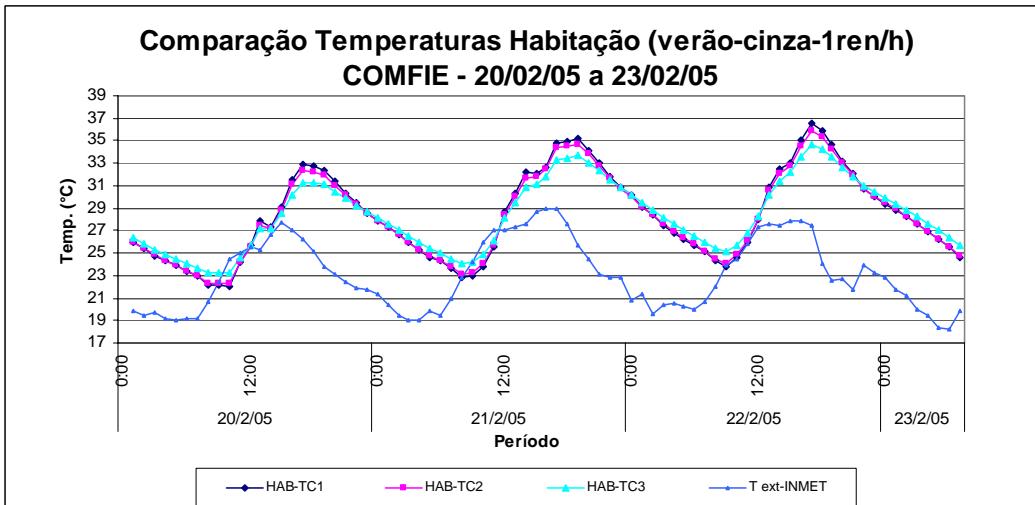


Figura 8 – Simulação da Habitação empregando-se as mesmas alternativas de parede utilizada para TC1, TC2 e TC3 – 1ren/h e sem ocupação – Verão – Pintura cinza

5.2 Avaliação do desempenho da habitação com modelo otimizado

Devido à constatação pelas simulações anteriores de que a habitação não atingia o nível de desempenho mínimo M, realizaram-se simulações com paredes na cor branca e taxa de renovação

de 5ren/h. Ainda, para esta configuração o desempenho M foi mantido. Desta forma, foram realizadas simulações com o acréscimo de laje de 10cm de espessura, com o intuito de verificar se haveria melhoria no desempenho térmico da habitação, com redução na transmissão de calor pela cobertura.

Foi constatado que, apesar da introdução da laje de 10cm, somente para simulação da habitação sem ocupação, cor da parede branca e taxa de renovação de 5ren/h foi possível obter redução das temperaturas máximas internas para valores próximos da referência de conforto intermediário (29°C), para os três dias considerados no estudo. Com esta configuração, HAB-TC3 apresentou temperatura máxima de 29,1°C no terceiro dia, com valor muito superior à temperatura máxima externa, mas próximo do nível de desempenho intermediário I. Na Figura 9, são apresentadas as curvas de temperatura interna e externa, com a configuração descrita.

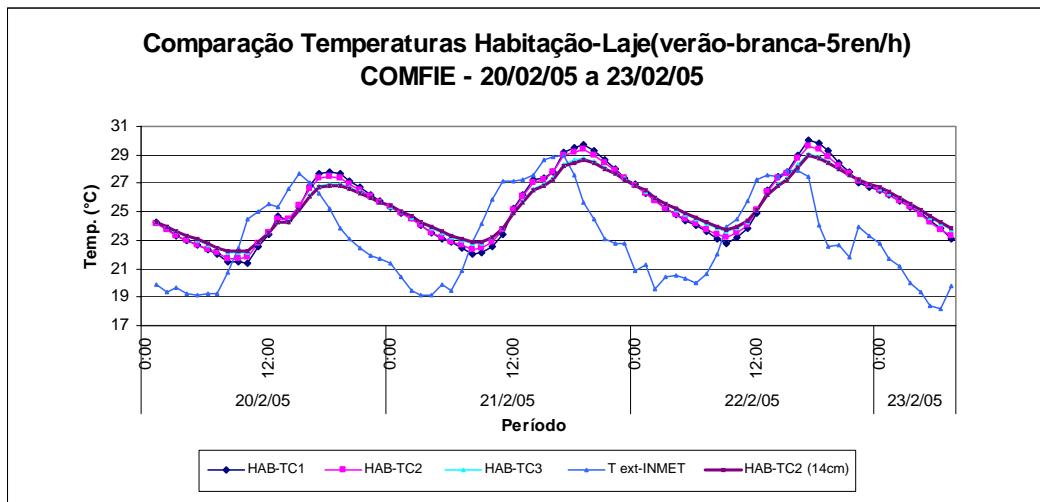


Figura 9 – Simulação da Habitação (laje de 10cm) empregando-se as mesmas alternativas de parede da TC1, TC2 e TC3 – 5ren/h e sem ocupação –Verão– Pintura branca

Considerando-se que somente o preenchimento de entulho no bloco de vedação de largura de 9cm não foi suficiente para permitir uma redução significativa na temperatura interna da habitação, foi proposta a utilização de paredes constituídas por bloco de 14cm de largura com enchimento interno em entulho, configuração semelhante à HAB-TC2, mas com diferente espessura de enchimento. Com esta configuração, é possível obter resultados de temperatura interna semelhantes à da HAB-TC3 (preenchimento de entulho e de revestimento) com laje de 10cm e pintura branca, conforme figura anterior.

6 CONCLUSÕES

A simulação computacional representa uma ferramenta alternativa para avaliação de desempenho térmico de habitações, não substituindo, porém, o monitoramento *in loco*. Este último apresenta um maior custo e a necessidade de um maior tempo de avaliação, devido à construção de protótipos e ao período de monitoramento. Este trabalho apresenta uma metodologia que alia a realização de monitoramento em *test-cells*, calibração dos parâmetros de entrada no software e simulação de habitação em escala real. A metodologia foi utilizada em virtude do menor custo da construção das células em escala reduzida e em função do não conhecimento prévio das características térmicas da proposta de subsistema de parede (preenchimento de entulho em bloco de concreto).

Quanto ao uso de resíduo, somente o preenchimento de entulho no bloco de vedação de largura de 9cm não foi suficiente para permitir uma redução significativa na temperatura interna da habitação. Uma redução mais significativa pôde ser obtida por meio do enchimento dos furos dos blocos de concreto de 14cm de espessura, conforme simulação apresentada. O uso de enchimento de resíduos representa, assim, uma alternativa potencialmente interessante, já que permite o melhor desempenho térmico de habitações de interesse social, além do fato de se reaproveitar o resíduo da construção, gerando uma aplicação alternativa do destino desse material.

Outro ponto interessante é a possibilidade de se utilizar o subsistema de parede para outras regiões que também apresentam recomendações para uso de parede externa pesada, o que representa a extensão de um pouco mais de um quarto do território nacional. Ao invés da utilização de materiais mais nobres para obter a melhoria de desempenho térmico (como o uso de reboco), pode-se utilizar o resíduo, permitindo economia de matéria-prima e de energia gasta no condicionamento térmico das habitações.

Devido ao menor custo, a metodologia apresentada pode ser uma alternativa viável para que se obtenha uma avaliação prévia do desempenho térmico de sistemas construtivos não-convenionais, conforme os avaliados no presente estudo. Sugere-se, porém, que seja realizada uma complementação dos resultados, determinando-se experimentalmente as características termo físicas dos materiais empregados e comprovando-se em escala real (por meio de protótipos de habitação) o comportamento térmico obtido internamente.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho de Edifícios Habitacionais de até 5 pavimentos – Parte 1: Requisitos gerais – NBR 02.136.01-001.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **Desempenho térmico de Edificações – Método de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações – NBR 02:135.07-002.** Rio de Janeiro, 2005.

_____. **Desempenho térmico de Edificações – Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social – NBR 15.220-3.** Rio de Janeiro, 2005.

CHENG; B.; GIVONI ,B.; NG, E. Sensitivity of Envelope Colour: Effect of thermal mass, Windows, and natural ventilation on high-rise buildings in hot humid Hong Kong. In: Conference on Passive and Low Energy Architecture – PLEA XX, 2003. **Proceedings.** Santiago, Chile: PLEA International, 2003. p.1229-1236.

KRÜGER, E. L.; GIVONI, B.; CHENG, V.; RORIZ, M. Predicting Indoor Temperatures and Thermal Performance of Test-cells. In: 35TH CONGRESS ON HEATING,REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING (HVAC &R), 2004. **Proceedings.** Belgrado - Servia: Union of Mechanical and Electrical Engineers and Technicians of Serbia, 2004. v. 1, p. 339-350.

MICHALOSKI, A. O. **Avaliação do desempenho térmico por meio de simulação computacional de habitações populares implantadas na Vila Tecnológica de Curitiba.** Curitiba, 2002. 204p. Dissertação de Mestrado – Tecnologia e Desenvolvimento, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná.

PEREIRA, I.; ALVES, T.; PINHEIRO, R.; ASSIS, E. Metodologia de tratamento de dados climáticos para inserção em softwares de simulação energética de edifícios. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC, X: São Paulo, 18 a 21 de julho de 2004. **Anais.** São Paulo, ENTAC, 2004.