



COMPROMETIDA COM A PROMOÇÃO DO DESENVOLVIMENTO DA ENGENHARIA E DAS CIÊNCIAS MECÂNICAS

VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL E ANÁLISE TRANSIENTE DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CÉLULAS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Lorena Monteiro Cavalcanti Barbosa, asukamonteiro@yahoo.com.br¹
Raimundo Nonato Calazans Duarte, rnduarte@dme.ufcg.edu.br¹
Hélio Cavalcanti Albuquerque de Melo, heliocnt@hotmail.com¹
Charles Cavalcante Marques, marques_charles@hotmail.com¹
Anderson Gomes dos Santos, seal6@hotmail.com¹

Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Av: Aprígio Veloso, 882 Bodocongó campina Grande-PB Brasil, CEP 58109-970, Caixa Postal 10069.

Resumo: *Esse trabalho busca explicitar a importância dos processos de transferência de calor entre as células de construção civil e o ambiente externo, por meio da análise do comportamento térmico (oriundo da irradiação solar e ocasionado pelas condições ambiente) das células isoladas e em conjunto, com o intuito de majorar a eficiência energética das habitações e reduzir seu custo de fabricação. Sendo assim, tais células foram analisadas através dos seguintes fatores: modelação do escoamento externo; convecção natural no interior das cavidades; e trocas radiativas utilizando um modelo matemático em três dimensões. A partir de simulações computacionais, (que foram realizadas por meio do código computacional comercial CFX 5.6, dados climáticos coletados e características termofísicas dos materiais da construção civil fornecidas projeto Habitare/UFRN), fora possível obter as distribuições do campo de velocidades e das variações de temperatura e outros termos em função dos diversos parâmetros térmicos e geométricos. Diante disto, ao se observar o comportamento de cada célula, pode-se selecionar o material construtivo que apresente o melhor conforto térmico, oferecendo um maior aproveitamento energético para estas construções, auxiliando a comunidade que nelas residem.*

Palavras-chave: *convecção natural, cavidades, métodos dos volumes finitos, CFX, dinâmica de dos fluidos computacionais*

1. INTRODUÇÃO

A transferência de calor por convecção natural em espaços confinados é de grande interesse no campo da engenharia e nos últimos anos vem ganhando numerosos estudos. Patterson & Imberger (1990), por exemplo, pesquisaram o caso de uma camada fluida em repouso num recinto cujas paredes verticais eram sujeitas a uma variação brusca de temperatura em um dado instante. Vasseur & Robillard (1982), analisaram a refrigeração convectiva transitória de uma cavidade retangular cujas paredes eram sujeitas a uma diminuição contínua da temperatura a taxas constantes. Eles mostraram que depois de um tempo longo, a solução torna-se quase estacionária, caracterizada por um campo de velocidade independente do tempo e por uma diferença de temperatura constante entre o líquido e a parede. O efeito da refrigeração brusca de uma parede vertical de uma célula preenchida de um líquido inicialmente à temperatura uniforme foi considerado por Nicolle (1985), onde se constatou que os resultados numéricos estão bem de acordo com as medidas experimentais obtidas pelos autores acima citados.

Kazmierczak & Chinoda (1992) pesquisaram a convecção natural transiente numa cavidade quadrada devida a uma variação senoidal da temperatura em uma parede vertical quente. A parede oposta (fria) é mantida a uma temperatura constante e inferior à da parede vertical. Os autores analisaram que os efeitos do período e a amplitude da temperatura oscilante sobre o escoamento do fluido e sobre a transferência de calor através da parede fria da cavidade. Todas as soluções obtidas são periódicas e mostram que apesar da dependência das condições de limites no que diz respeito ao tempo e as variações notáveis dos campos de escoamento e de temperatura, a transferência de calor média avaliada sobre um ciclo é aproximadamente igual ao valor obtido quando a parede quente é mantida a uma temperatura constante.

Kuhn & Oosthuizen (1987) examinaram numericamente a convecção natural transiente em uma cavidade retangular parcialmente aquecida. Concluíram que o fluido aquecido se move de cima para baixo e que há aumento do número de Nusselt até um máximo e diminuição posterior. Experimentos semelhantes foram feitos por Lakhal e Hasnaoui (1999), analisaram a convecção natural em regime laminar em uma quadrada cavidade através de elementos finitos, onde a fonte de calor tinha um comportamento senoidal.

Esse artigo apresentará o resultado do estudo da convecção natural em sete células construídas de materiais distintos, a partir de simulações computacionais com o software CFX- 5.6, tendo o intuito de observar o comportamento de cada material, possibilitando a seleção do material construtivo que apresente o melhor conforto térmico, no qual permita melhorar a eficiência energética das habitações.

2. MÉTODOS E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

As células estudadas apresentam as dimensões de 1,60 m x 1,80 m na base com 1,80 m de altura. As características termo-físicas (densidade, condutividade térmica, difusividades térmica e capacidade térmica), medidas no Laboratório de Transferência de Calor do departamento de Engenharia Mecânica da UFRN, são apresentadas na Tab. (1) para os diversos materiais construtivos das paredes. Na Tabela (1) e no restante do presente trabalho, adotou-se a seguinte simbologia: k [W/m.K] é a condutividade térmica, ρ [kg/m³] a densidade ou massa específica, C_p [kJ/kg.K] a capacidade térmica, CSP é o concreto sem pasta térmica para três densidades superficiais (800, 1000 e 1200 kg/m²), BCL é o bloco em concreto leve, e CCP é o concreto com pasta térmica também para três densidades superficiais distintas.

Tabela 1. Os vários tipos de materiais construtivos analisados e suas propriedades.

Material	k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C_p (J/kg.K)
CSP 800	0,218	108	1351,1
CSP 1000	0,335	1246	1179,779
CSP 1200	0,502	1514	970,937
BCL	1,054	1983	977,110
CCP 800	0,300	1088	1332,72
CCP 1000	0,333	1246	1163,72
CCP 1200	0,555	1514	1194,398

A Figura (1a) mostra quatro das sete células estudadas e a cabine central onde foi instalado todo o sistema de aquisição automática de dados. A Figura (1b) ilustra a disposição geométrica de todas as células simuladas, incluindo a cabine central para aquisição de dados experimentais localizada ao centro. Nessa última ilustração, há ainda uma célula à esquerda do conjunto de oito células uniformemente distribuídas em torno da cabine central que não foi considerada na presente pesquisa.



Figura 1a. Células Testes

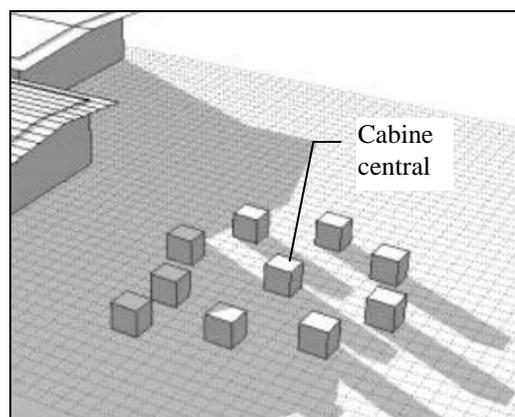


Figura 1b. Disposição das células em torno da cabine central

É importante citar que a imagem da Fig.(1b) foi produzida por um software de previsão do movimento aparente do sol, demonstrando a ocorrência de sombreamento sobre as células nas primeiras horas do dia em função do posicionamento e dimensões das construções vizinhas. Esse efeito só foi percebido depois da construção das células, merecendo atenção no que diz respeito a análise dos dados experimentais em trabalhos futuros, tendo em vista que o momento inicial do estímulo térmico solar não é único entre as células. A partir dessa figura, também é possível

visualizar que as construções que provocam o sombreamento estão a oeste do campo de células. Sendo assim, buscou-se orientar as células de modo que a direção normal de cada uma de suas faces verticais coincidissem com as orientações geográficas primárias, ou seja, norte, sul, leste e oeste.

Observando as posições das células na Fig. (1b), considerando que o sol nasce no leste, assim a parede leste terá uma temperatura variável com o tempo, enquanto a oeste foi considerada a mais fria, já a parede norte e sul teriam temperaturas médias e isotérmicas, as paredes de cima e de baixo foram consideradas adiabáticas.

2.1. Método Computacional

O estudo da convecção natural em cavidades fechadas tri-dimensionais não é um problema de fácil resolução numérica, acarretando no interesse de usar métodos computacionais, visto que esses têm apresentado resultados similares aos valores experimentais.

A malha gerada é constituída por elementos tetraédricos e prismáticos, sua discretização é apresentada na Fig. (2b). Na Figura (2a) vê-se a geometria da célula no domínio Ω , preenchida de ar ($Pr = 0.7$). As superfícies S_1, S_2 e S_3 são isotérmicas, onde a primeira apresenta menor temperatura. As superfícies S_4 e S_5 são isoladas termicamente enquanto a S_6 sua temperatura varia em relação ao tempo.

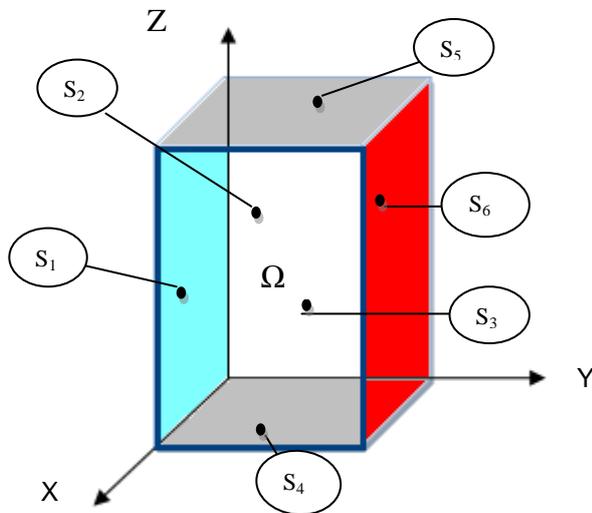


Figura 2a. Geometria da célula

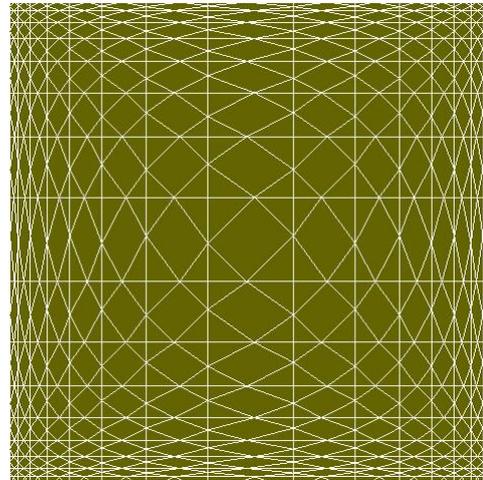


Figura 2b. Malha discretizada

Hipóteses Consideradas

As seguintes hipóteses são empregadas nesse trabalho:

- Domínio geométrico tridimensional;
- Regime transiente;
- Escoamento turbulento;

Modelo Matemático

As seguintes equações foram utilizadas para a resolução do problema descrito:

- Continuidade

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

- Quantidade de movimento

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g \beta (T - T_0) \quad (4)$$

iii) Energia

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{K}{\rho c_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (5)$$

Onde u, v e w são as componentes das velocidades do escoamento (m/s); x, y e z são as posições no espaço (m); t é o tempo (s); ρ é a densidade do fluido (kg/m^3); p é a pressão relativa do escoamento (Pa); g_x, g_y e g_z são as componentes das acelerações da gravidade local (m/s^2); e β é coeficiente volumétrico de expansão térmica (K^{-1}).

2.2. Condição de Contorno – Transiente Periódica

A superfície S_6 é alimentada por uma fonte de calor solar. Considerando que o Sol tenha um caminho senoidal, durante o decorrer do dia, a temperatura nessa superfície terá uma forma trigonométrica para um período de insolação de 12 horas, onde o dia nascerá às 0h, o meio-dia solar acontecerá às 6h e o por-do-sol às 12 horas.

Admiti-se que:

$$T_6(0h) = T_6(12h) = T_{\min} \quad (\text{Em } S_6) \quad (6)$$

$$T_6(6h) = T_{\max} \quad \text{onde} \quad \left. \frac{\partial T_6}{\partial t} \right|_{t=6h} = 0 \quad (\text{Em } S_6) \quad (7)$$

Essa superfície terá a seguinte equação:

$$T_6(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \text{Sin} \left(\frac{\pi t}{12} \right) \quad (8)$$

Onde T_{\max} e T_{\min} são as temperaturas máximas e mínimas ao longo de um dia típico, e T_{med} é a temperatura média adotada nas superfícies laterais (S_2 a S_3). Nessa simulação os valores adotados foram:

$$T_{\min} = 20^\circ\text{C}; \quad T_{\max} = 40^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad T_{\text{med}} = 30^\circ\text{C} \quad (9)$$

As seguintes condições de contornos foram implementadas:

$$T = T_{\min} \quad (\text{em } S_1) \quad (10)$$

$$T = T_{\text{med}} \quad (\text{em } S_2 \text{ a } S_3), \quad (11)$$

$$q = \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (\text{em } S_4 \text{ e } S_5), \quad (12)$$

$$T_6(t) = T_{\min} + (T_{\max} - T_{\min}) \cdot \text{Sin} \left(\frac{\pi t}{12} \right) \quad (\text{em } S_6), \quad (13)$$

$$u_0 = v_0 = w_0 = 0 \quad (\text{no domínio } \Omega), \quad (14)$$

Onde S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 e S_6 representam as superfícies na fronteira do domínio Ω , mostrado pela Fig. (2a).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados será realizada através das Fig. (3) e (8), onde serão analisadas a temperatura e velocidade do ar ao longo do comprimento da cavidade.

Na Figura (3a) e (3b) observa-se o comportamento da distribuição de temperatura média referente à linha $(x, y, z) = (0.66\text{m}, y, 0.85\text{m})$, ou seja, foi realizada uma média da temperatura que passava por essa linha, para cada hora de

insolação, em todos os materiais de construção utilizados nesse projeto, os concretos com e sem pasta 800, 1000, 1200; e estes dados foram postos em forma do gráfico a seguir. Observa-se que a temperatura tem um comportamento quase linear, e os concretos 1200 com/sem pasta apresentam maiores temperaturas, sendo esta chegando ao limiar máximo às doze horas variando entre 27 e 27.6 °C.

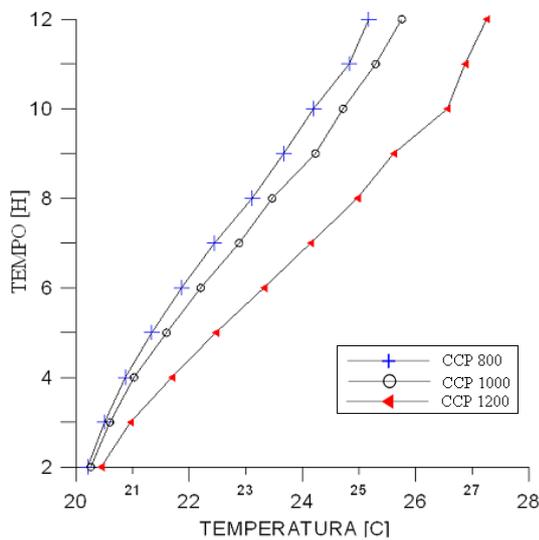


Figura 3a. Comportamento do concreto com pasta

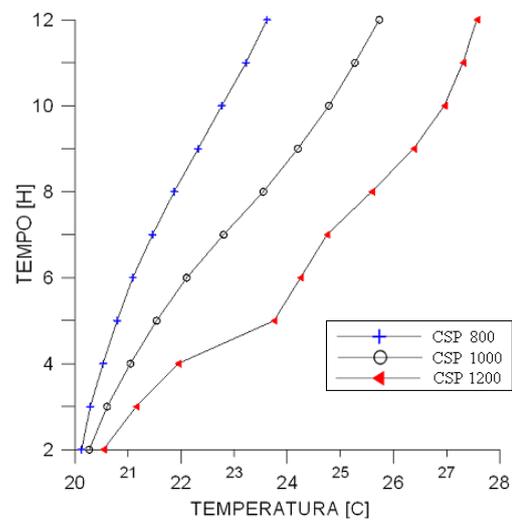


Figura 3b. Comportamento do concreto sem pasta

Na Figura (4a) e (4b), vê-se a distribuição de temperatura na linha $(x,y,z)=(0.66m, y, 0.85m)$, para diferentes materiais de construção: concreto com ou sem pasta 800, 1000 e 1200 após doze horas de insolação. O ar fica mais quente dentro da cavidade que tem o concreto 1200 como material de construção, onde seu pico ocorre no final da célula, ou seja quando o comprimento é aproximadamente 2 metros, perto da parede quente.

Quando o tempo de insolação ultrapassa o período de seis horas a temperatura da fonte de calor começa a diminuir até atingir um mínimo em 12 horas. Mesmo com a diminuição da fonte de calor, a temperatura continua aumentando dentro da cavidade, isso ocorre devido à retenção de calor provocada pelos concretos. Como os gráficos, para os outros tempos apresentam certa similaridade, escolheu-se o gráfico onde a temperatura é máxima.

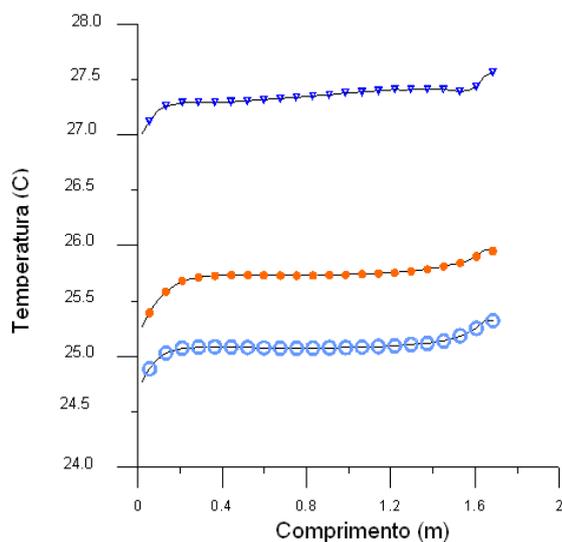


Figura 4a. Distribuição da temperatura utilizando os concretos com pasta para doze horas de insolação

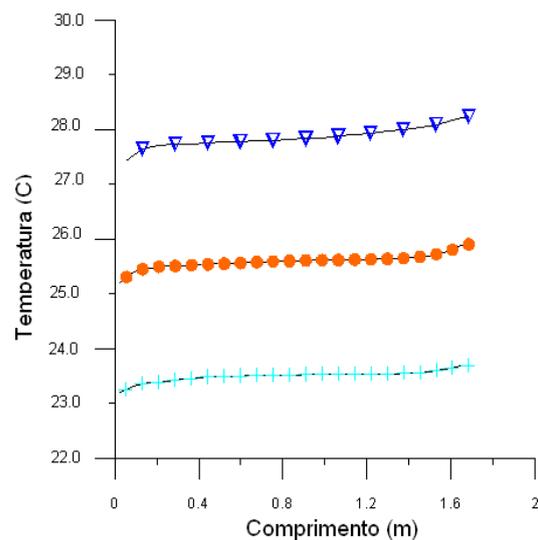


Figura 4b. Distribuição da temperatura utilizando os concretos sem pasta para doze horas de insolação

Na Figura (5), observa-se o comportamento da distribuição de temperatura do ar dentro de uma cavidade construída por concreto comum (BLC), na linha $(x, y, z)=(0.66m, y, 0.85m)$ em diferentes tempos de insolação: três a doze horas. A máxima temperatura ocorre às doze horas de insolação, aproximadamente 29,5° Celsius. Para as mesmas condições, esse material apresenta maior temperatura do ar.

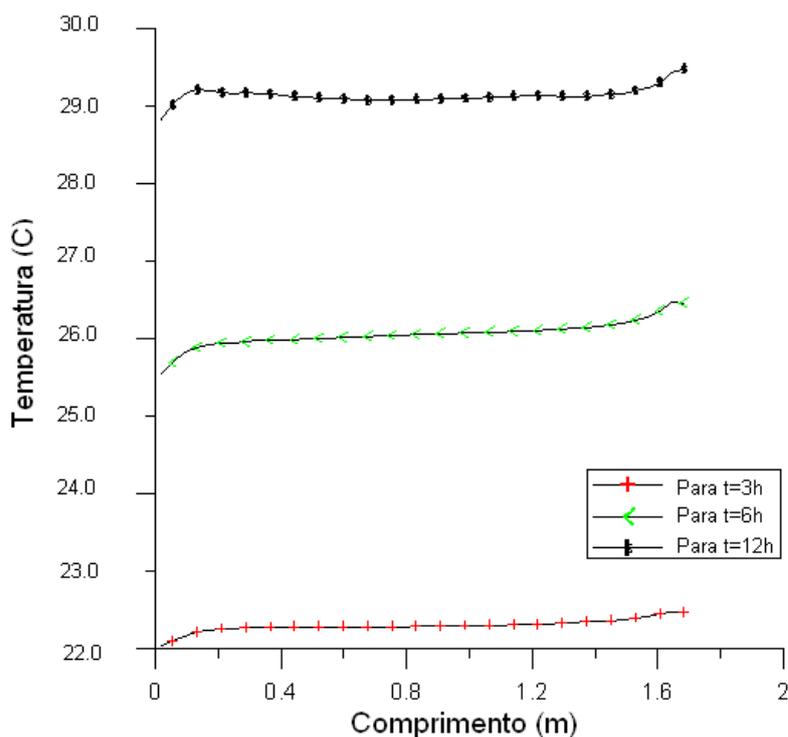


Figura 5. Distribuição da temperatura utilizando concreto comum em diferentes intervalos de tempo

Para uma melhor visualização da distribuição da temperatura é apresentado à Fig. (6a) e Fig. (6b) que são as curvas de contorno no plano XY, onde se observa que a distribuição da temperatura do ar dentro da cavidade é bastante homogênea.

A Figura (6a) apresenta o concreto sem pasta 800, sua temperatura média dentro da cavidade é aproximadamente 24°C, em certos pontos essa pode ser menor e atingir perto da parede fria 22.26° Celsius. Já na Figura (6b) o ar dentro do concreto sem pasta 1200 tem uma maior temperatura, essa pode atingir perto da parede quente 29.69° Celsius.

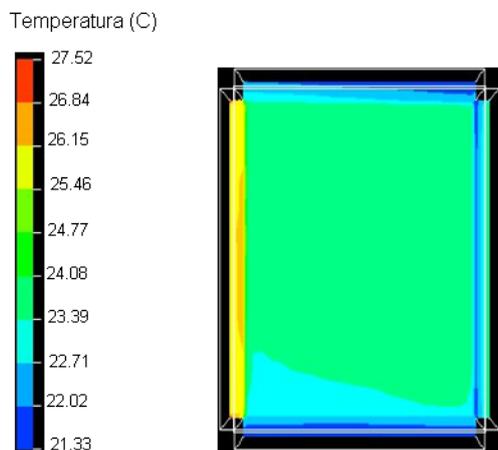
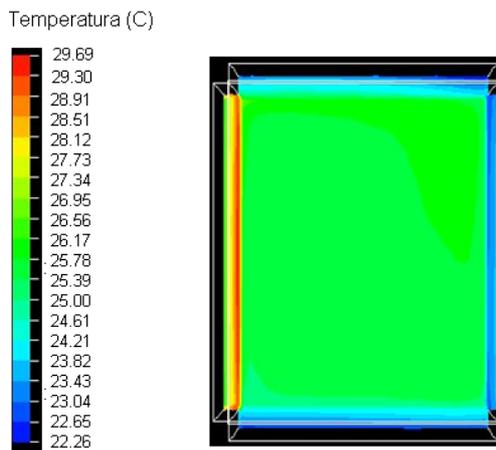


Figura 6a. Curvas de contorno da temperatura no plano $(x,y,z) = (x,y,0.85)$ para $t= 12h$: concreto sem pasta 800.



Figuras 6b. curvas de contorno da temperatura no plano $(x,y,z) = (x,y,0.85)$ para $t= 12h$: concreto sem pasta 1200.

A Figura (7) apresenta a distribuição da velocidade do ar para doze horas de luz solar, respectivamente. Como o comportamento da velocidade do ar dentro dos concretos é similar apenas será avaliado o concreto com pasta. Observa-se que as velocidades são muito baixas, e seu comportamento é praticamente igual em qualquer tipo de concreto. Os três tipos de concreto têm praticamente a mesma velocidade. Ainda nessa figura vê-se a circulação do ar.

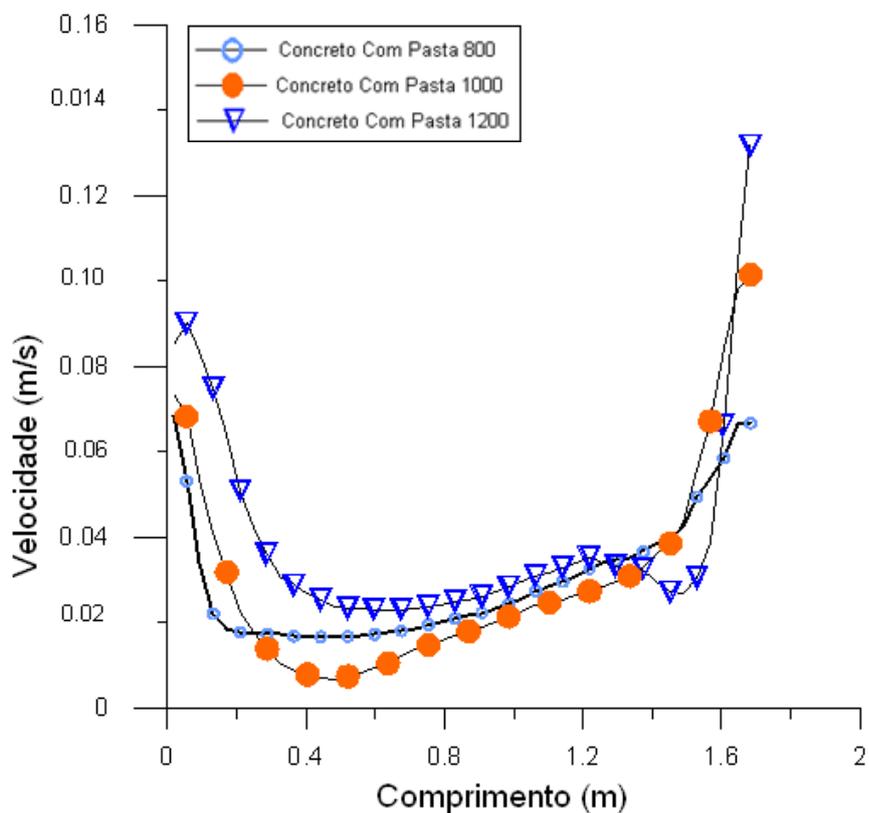


Figura 7. Distribuição da velocidade do ar em três horas de insolação utilizando o concreto com pasta.

Para uma melhor visualização da circulação do ar dentro da cavidade é apresentado a Fig. (8) (concreto com pasta 800), no plano $(x,y,z)=(x,y,0.85m)$. Vê-se como o ar circula: na parede quente o ar sobe e na fria ele desce. Essa velocidade é máxima em quando $t=12$ horas.

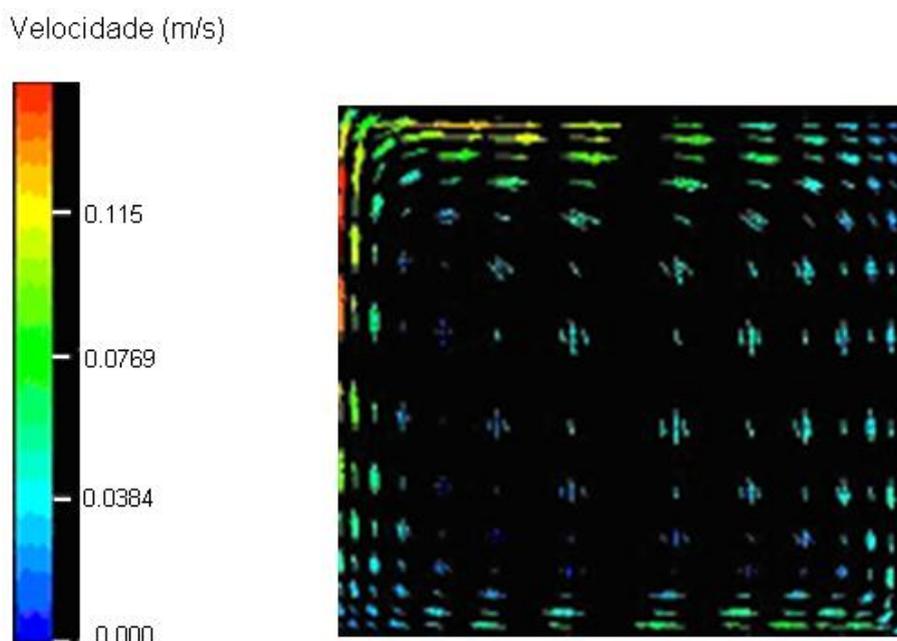


Figura 8. circulação do ar dentro da célula no plano $(x,y,z) = (x,y,0.85)$ para $t=12h$, concreto com pasta 800.

4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com a simulação computacional foram satisfatórios, o software CFX 5.6 se mostrou eficiente em descrever a transferência de calor dentro de uma cavidade 3D.

O concreto 800 com ou sem pasta apresenta melhores resultados ao nível de conforto térmico já que para as mesmas condições de contorno obteve menores temperaturas e variações das mesmas. Sendo o projeto concebido para a Região Nordeste, e essa possui em geral um clima árido principalmente no verão, entre os materiais simulados o concreto 800 é o material mais indicado para a construção.

Por fim, percebe-se que o projeto desenvolvido é de suma importância para a região, beneficiando a população residente, além de majorar o escopo estrutural/físico na elaboração de habitações.

5. REFERÊNCIAS

- D. Kuhnand & P. H. Oosthuizen., 1987, “Unsteady natural convection in a partially heat edrectangular cavity”, ASME Journal of Heat Transfer 109,pp.789–801.
- E .K .Lakhal, & M .Hasnaoui, & P.Vasseur., 1999, “Numerical study of transient natural convectionin acavity heated periodically with dierently pesofexcitations”, International Journal of Heat and Mass Transfer 42,no.21,pp. 3927–3941.
- J. Patterson, & J. Imberger., 1990, “Unstead natural convection in a rectangular cavity”, Int. J. Fluid Mech, pp. 65-86.
- M. Kazmierczak, Z. Chinoda., 1992 “Buoyancy-driven flow in an enclosure with time periodic boundary conditions”, Int. J. Heat Mass Transfer 35, pp. 2027-2038.
- P. Vasseur & L. Robillard.,1982, “Natural convection in a rectangular cabity with wall temperature decreasing at uniform rate”, Warme-und stoffubertragung 16,pp. 199-207.
- V.F Nicolette, K, T Yand, J.R Loyd.,1985, “Transient cooling by natural convection in a two-dimensional square enclosure”, Int. J Heat Mass Transfer 28,pp. 1721-1732.



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

COMPUTER SIMULATION AND ANALYSIS OF TRANSIENT HEAT TRANSFER CIVIL CELL CONSTRUCTION

Lorena Monteiro Cavalcanti Barbosa, asukamonteiro@yahoo.com.br¹
Raimundo Nonato Calazans Duarte, rnduarte@dme.ufcg.edu.br¹
Hélio Cavalcanti Albuquerque de Melo, heliocnt@hotmail.com¹
Charles Cavalcante Marques, marques_charles@hotmail.com¹
Anderson Gomes dos Santos, seal6@hotmail.com¹

¹Federal University of Campina Grande, Center of Science and Technology, Academic Unit of Mechanical Engineering, Av: Aprígio Veloso, 882 Bodocongó. Campina Grande-PB Brazil, CEP 58109-970, PO Box 10069.

***Abstract.** This work seeks to clarify the importance of processes of heat transfer between the cells of civil construction and the external environment, by analyzing the thermal behavior (coming from solar radiation caused by environmental conditions) of the cells isolated and combined in order of increasing the energy efficiency of homes and the cost of production. Thus, reducing such cells were analyzed by the following factors: modeling, external flow, natural convection within the cavities, and radiative exchange using a mathematical model in three dimensions. From computer simulations, (which were performed using commercial computer code CFX 5.6, climatic data collected and thermo-physical characteristics of the materials of construction project provided Habitare/UFRN), it was able to obtain the distributions of the velocity field and temperature and other terms for different thermal parameters and geometry. In view of this, by observing the behavior of each cell, you can select the building material that offers the best thermal comfort, offering greater energy use for these buildings, assisting the community that live in them.*

***Keywords:** natural convection, cavities, finite volume method, CFX, computational fluid dynamics*