



ESTUDO NUMÉRICO E EXPERIMENTAL DA CONVECÇÃO NATURAL EM CAVIDADES DIFERENCIALMENTE AQUECIDAS

RICARDO A.V. RAMOS, CASSIO R.M. MAIA, ALESSANDRO T. TAKAKI

UNESP – Departamento de Engenharia Mecânica
Campus de Ilha Solteira, Av. Brasil, 56 – Ilha Solteira – SP – 15385-000 – Brasil

(Recibido 15 de febrero de 2005, para publicación 15 de noviembre de 2007)

Resumo – Neste trabalho foi realizado um estudo numérico e experimental da convecção natural em uma cavidade térmica com uma das paredes verticais mantida resfriada e a outra aquecida, sendo as paredes inferior e superior isoladas. Foi verificada a influência do gradiente térmico entre as paredes, da razão de aspecto e do ângulo de inclinação da cavidade, sobre o escoamento e a transferência de calor na cavidade. A solução numérica foi obtida pela técnica de volumes de controle finitos, sendo o acoplamento pressão-velocidade feito pelo método SIMPLE. Foram feitas hipóteses de escoamento laminar, bidimensional, incompressível e em regime permanente e as propriedades físicas foram consideradas constantes, exceto no termo de empuxo, onde foi usada a aproximação de Boussinesq. Foram utilizadas malhas estruturadas não uniformes com maior refinamento nas regiões próximas às paredes, tendo sido obtidos os campos de velocidade e temperatura, bem como os perfis de temperatura na altura média da cavidade. Foram realizados testes experimentais para medida da temperatura, utilizando-se termopares e um sistema de aquisição de dados por computador, e para a visualização do escoamento, usando a técnica da injeção de fumaça. Posteriormente, foi feita uma comparação entre alguns resultados numéricos e experimentais correspondentes.

Palavras chave – Convección natural, cavidad térmica, visualización de flujo, medición de temperatura, simulación numérica.

1. INTRODUÇÃO

A convecção natural desempenha um papel importante em alguns processos de transferência de calor devido à união do escoamento de fluido e do transporte de energia, sendo, portanto, um fenômeno de interesse em muitos campos de pesquisa. Como exemplo, pode ser citado o escoamento em cavidades com paredes verticais diferencialmente aquecidas, que tem aplicações em resfriamento de componentes eletrônicos, coletores de energia solar, condicionamento climático de ambientes fechados, reatores nucleares, entre outras.

Existem vários trabalhos numéricos e/ou experimentais sobre o assunto [1-18], sendo que alguns mais diretamente relacionados ao presente trabalho estão resumidos a seguir.

De Vahl Davis [1] desenvolveu um método computacional para obter uma solução precisa das equações bidimensionais que descrevem a convecção natural em uma cavidade com paredes laterais diferencialmente aquecidas. Foram utilizadas malhas regulares uniformes e com os resultados obtidos foi empregado um sistema de extrapolação para gerar uma solução de grande precisão para uma malha muito mais refinada. Perfis de velocidade e temperatura, bem como taxas de transferência de calor, foram obtidos para vários números de Rayleigh (10^3 , 10^4 , 10^5 e 10^6).

Hiller *et al.* [2] analisaram numericamente e experimentalmente o escoamento convectivo dentro de uma cavidade cúbica com duas paredes verticais aquecidas, para números de Rayleigh variando entre 2×10^4 a 1×10^5 . As estruturas do escoamento observado se mostraram fortemente tridimensionais para todos os casos considerados.

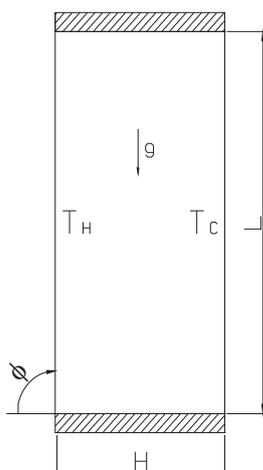


Fig. 1. Cavidade térmica diferencialmente aquecida.

Tabela 1. Descrição dos casos considerados.

Casos	1	2	3	4	5	6	7
ΔT (°C)	30	50	70	50	50	50	50
H/L	1/4	1/4	1/4	1/8	1/2	1/4	1/4
ϕ	90°	90°	90°	90°	90°	45°	0°

Lage & Bejan [3] estudaram numericamente o fenômeno da convecção natural em uma cavidade quadrada aquecida e resfriada na direção horizontal, para números de Prandtl na faixa de 0,01 a 10 e números de Rayleigh variando entre 10^2 e 10^{11} . O estudo foi concentrado na detecção da inércia das flutuações no campo do escoamento e na determinação do máximo número de Rayleigh no qual escoamentos laminares ainda são possíveis.

Hsieh & Wang [4] estudaram a convecção natural em três dimensões em cavidades retangulares com paredes verticais diferencialmente aquecidas e com diferentes fluidos de trabalho (ar, água e óleo de silicone). O experimento foi realizado com moderados e altos números de Rayleigh (1×10^6 até 2×10^9), característicos de convecção natural. O campo de temperaturas dentro da cavidade foi obtido e a visualização do escoamento foi realizada pela adição de partículas reflexivas de alumínio no fluido, sendo a iluminação feita por meio de uma folha de luz laser.

Leong *et al.* [5] realizaram um estudo para a determinação experimental do número de Nusselt no escoamento convectivo em uma cavidade cúbica preenchida com ar que tem um par de paredes opostas isotérmicas mantidas a diferentes temperaturas (uma quente e a outra fria) e com as paredes remanescentes tendo uma variação linear de temperatura. Foram determinados os números de Nusselt médios na parede fria para cinco números de Rayleigh (10^4 , 10^5 , 10^6 , 10^7 e 10^8) e para três ângulos de inclinação das paredes isotérmicas com relação ao plano horizontal (0, 45 e 90°).

No presente trabalho são realizados estudos numérico e experimental da convecção natural no escoamento no interior de uma cavidade térmica com as paredes inferior e superior isoladas e com umas das paredes laterais aquecida e a outra resfriada, tal como mostrado esquematicamente na Fig. 1.

Serão observadas as influências do gradiente térmico imposto nas paredes laterais, da variação da razão de aspecto e do ângulo de inclinação da cavidade, sobre o escoamento e a transferência de calor, considerando-se três valores para cada um desses parâmetros, resultando os casos apresentados na Tabela 1. O caso 2 será considerado como um caso básico para efeito de comparação dos resultados.

Serão determinados numericamente os campos de velocidade e de temperatura no escoamento e o perfil da temperatura na altura média da cavidade. Adicionalmente, serão realizadas medidas de temperatura sobre as superfícies e no campo do escoamento, utilizando-se termopares e um sistema de aquisição de dados por computador. Posteriormente, será feita a visualização do escoamento de um caso básico (caso 2), usando a técnica da injeção da fumaça, e, por fim, serão comparados alguns resultados numéricos com os experimentais correspondentes.

2. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

A análise numérica de um problema propicia informações úteis para o projeto e uma interessante visão dos processos físicos, além de enriquecer informações experimentais por suprir detalhes que podem ser difíceis, ou mesmo impossíveis, de se medir, desde que se tenha um modelo que represente adequadamente os fenômenos envolvidos. Além disso, ela pode ser feita com um custo e um tempo muito inferior em relação ao requerido para um teste experimental correspondente. Por outro lado, é importante validar os resultados numéricos por comparação com dados experimentais representativos, que é o que se pretende neste trabalho.

Para a solução numérica dos problemas o escoamento foi considerado laminar, bidimensional, incompressível e em regime permanente. O fluido foi considerado como newtoniano e as propriedades físicas como constantes, exceto no termo de empuxo, onde foi feita a aproximação de Boussinesq. Além disso, o efeito da radiação foi desprezado.

Com estas considerações as equações governantes do escoamento (conservação da massa, da quantidade de movimento e da energia) foram simplificadas podem ser escritas na seguinte forma:

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

$$\rho \left[u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left[u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g \beta (T - T_0) + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho c_p \left[u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right] = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

Estas equações são válidas para todo o domínio, lembrando apenas que nas regiões sólidas as velocidades do fluido são nulas e que a condutividade térmica depende do material local. Todas as outras condições de contorno estão especificadas na Fig. 1.

A solução numérica dos problemas foi obtida com o programa comercial FLUENT[®], que é baseado na técnica de volumes de controle finitos, sendo o acoplamento pressão-velocidade feito pelo método SIMPLE [19].

Foram utilizadas malhas estruturadas não uniformes com maior refinamento na região próxima as paredes e com crescimento suave a partir desta região (razão menor que 10%) para minimizar as instabilidades numéricas [20]. A escolha das malhas foi feita após a realização de testes para verificar a independência da solução, considerando o balanço de energia nas cavidades e levando-se em conta o custo computacional e a precisão.

Foram experimentados vários fatores de sub-relaxação para atenuar a diferença entre os valores calculados entre duas iterações sucessivas e acelerar o processo de convergência, embora não se tenha encontrado um fator ótimo para cada tipo de problema. A solução numérica foi considerada como convergida quando os resíduos das equações da conservação da massa, quantidade de movimento e energia, para todo o domínio, foram menores que 10^{-5} .

Vale destacar que as propriedades físicas dos materiais e dos fluidos foram consideradas na temperatura média das cavidades e extraídas da referência [21].

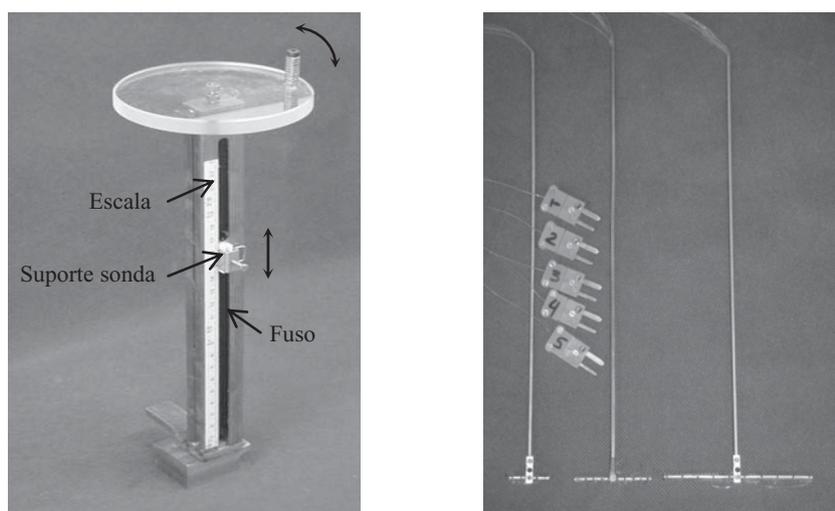


Fig. 2. Sistema posicionador e sondas com termopares.

Maiores informações sobre o procedimento numérico podem ser obtidas em [22].

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização dos testes experimentais foi elaborada uma forma construtiva das cavidades de modo que fosse possível passar de uma configuração para a outra rapidamente e sem maiores dificuldades. As cavidades construídas têm a forma cúbica e dimensões internas de $25 \times 200 \times 150$, $50 \times 200 \times 150$ e $100 \times 200 \times 150$ mm sendo constituídas por uma parte central composta por três paredes de fibra de vidro (4mm), formando um “U”, uma parede frontal de acrílico (12mm), e, sendo uma das superfícies laterais constituídas por uma das paredes de um reservatório térmico frio. A outra superfície lateral oposta à resfriada é constituída por uma parte integrante de um reservatório térmico, mantido a uma temperatura quente constante.

Os reservatórios térmicos foram feitos de fibra de vidro, com exceção da parede interna que é de cobre (3 mm). A água entra nos reservatórios pela parte inferior e sai pela superior, mantendo, assim, a temperatura uniforme sobre toda a parede de cobre. A temperatura dos reservatórios térmicos deve ser mantida constante por meio da circulação de água ou óleo proveniente de um banho termostático, sendo que no caso do resfriamento é necessária a passagem intermediária por uma serpentina inserida em um reservatório com gelo. Todas as superfícies externas da cavidade, com exceção da frontal, foram isoladas termicamente do ambiente por meio de poliestireno (25 mm).

Para a realização de medidas de temperatura foram usados termopares tipo T AWG 36 e um sistema de aquisição de dados (HBM-MGCPlus) controlado por um computador. Depois de calibrados, 5 termopares foram fixados em cada uma das paredes de cobre (um no centro e outros 4 equidistantes 1cm de cada canto) e outros foram montados nas sondas utilizadas em um posicionador especialmente construído para permitir a obtenção do campo de temperatura no interior da cavidade (Fig. 2).

Antes de iniciar os testes experimentais para medida de temperatura e visualização do escoamento, a temperatura dos banhos era controlada de modo a permitir manter constante a temperatura das paredes dos reservatórios que constituem a cavidade. Foi feito um monitoramento da temperatura destas paredes ao longo da realização dos experimentos, quando havia um aumento da temperatura, adicionava-se mais gelo no reservatório e quando ocorria um decréscimo da temperatura, ligava-se a resistência do banho termostático para aquecimento, tendo sido sempre considerada uma tolerância de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ em torno do valor desejado da temperatura da parede.

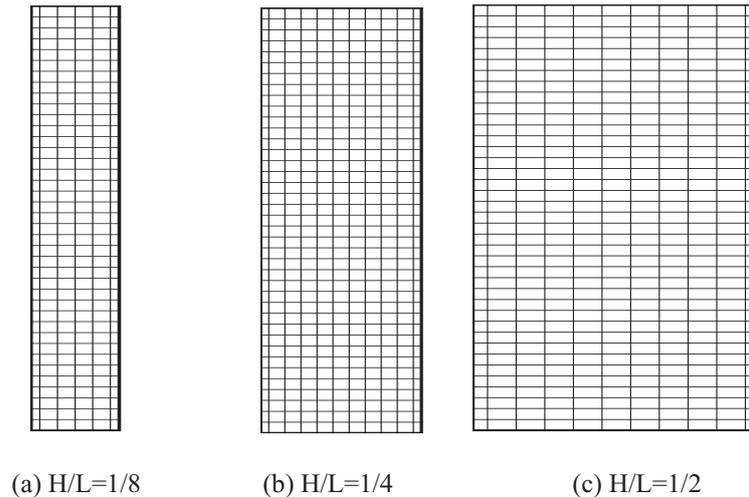


Fig. 3. Pontos de medidas de temperatura.

No caso 3, no qual $\Delta T = 70^\circ\text{C}$, foi necessário substituir a água do reservatório quente por óleo automotivo para poder manter a temperatura da parede em 100°C , uma vez que a temperatura no banho termostático tinha que ser um pouco superior a 100°C porque existiam perdas de calor ao longo da mangueira de silicone que alimenta o reservatório quente.

Foram feitas medidas de temperatura no plano transversal central do campo do escoamento, sempre após o estabelecimento do regime permanente, utilizando-se sondas construídas para cada razão aspecto estudada, sendo adquiridos simultaneamente as temperaturas de todos os termopares da sonda e das paredes de cobre quente e fria durante 60 segundos a uma frequência de 1Hz para cada posição de medida da sonda (deslocamento de 5 em 5mm). Vale ressaltar que foi aguardado um tempo extra de 60 segundos após cada deslocamento da sonda para o reinício das medidas, para evitar qualquer tipo de perturbação no escoamento. Os pontos de medidas de temperatura obtidos pelo deslocamento das sondas encontram-se no cruzamento das linhas horizontais e verticais das malhas ilustradas na Fig. 3.

Todo o gerenciamento da aquisição de dados foi feito por um micro-computador, através do programa CATMAN que acompanha o sistema de aquisição MGCPlus, no qual foram obtidos as médias dos 60 valores de temperatura (durante 60 segundos) para cada termopar. Com esses valores médios, foram construídos os campos de temperatura e a distribuição de temperatura na parede com fontes utilizando os programas TECPLOT 8.0 e Microsoft EXCEL.

A análise das incertezas nas medidas de temperatura foi feita com base nas técnicas preconizadas por Moffat [23] para experimentos de amostragem simples. Vale ressaltar que a precisão dos termopares utilizados neste experimento é da ordem de $0,1^\circ\text{C}$, mas levando-se em conta alguns dos parâmetros mais relevantes na determinação das temperaturas, temos uma precisão de medida em torno de $0,4^\circ\text{C}$.

Entre as várias técnicas de visualização existentes [24], utilizou-se a técnica da injeção de fumaça em ar, sendo que a fumaça foi obtida através da queima de incenso por se tratar de um produto não tóxico, barato e de fácil manuseio, embora possa ser obtida a partir de outros produtos (tabaco, breu, óleo, etc...). Além disso, a fumaça produzida pela queima do incenso é constituída por partículas pequenas o bastante para seguir o escoamento a ser estudado, mas suficientemente grande para difundir a luz de forma que o registro do escoamento possa ser obtido através de fotografias. A injeção da fumaça na cavidade foi feita de maneira cuidadosa para não promover perturbações significantes no escoamento.

Para a obtenção das imagens utilizou-se uma câmera SLR (*Single Lens Reflex*) 35 mm Nikon F4s equipada com diferentes acessórios e objetivas, filmes fotográficos profissionais preto e branco KODAK T-MAX tipo 135 com negativos 2x36mm (ISO 100, 400 e 3200) e, também, uma câmera fotográfica digital Sony MVC-CD250. O pós-processamento das imagens foi feito através do software Corel Photo Paint 10.

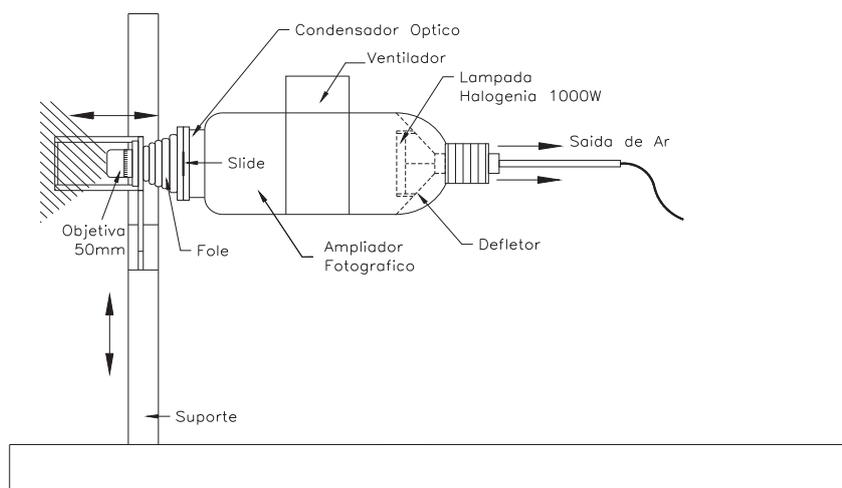
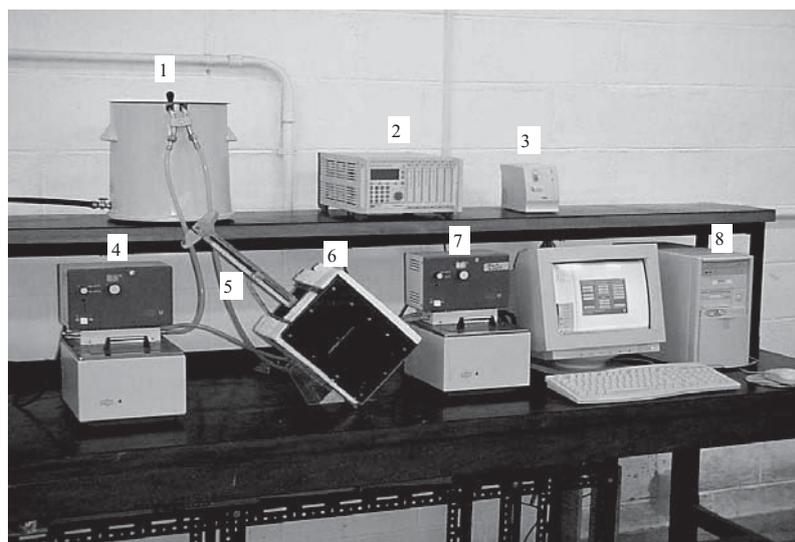


Fig. 4. Representação do sistema de iluminação.



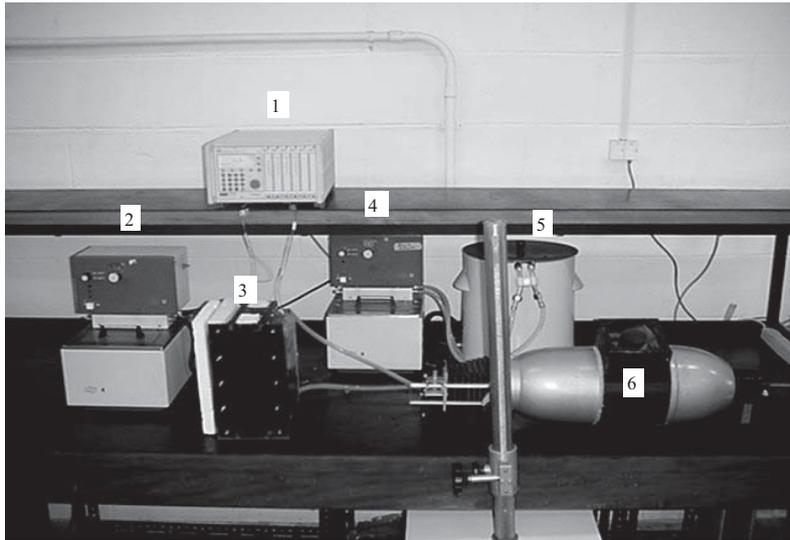
1. Reservatório de gelo
2. Sistema de aquisição
3. Estabilizador
4. Banho termostático frio
5. Posicionador da Sonda
6. Cavidade
7. Banho termostático quente
8. Microcomputador

Fig. 5. Foto da montagem experimental para medidas de temperatura na cavidade.

Vale destacar que a melhor forma de iluminação seria por meio de folha de laser produzida por um laser de alta potência. Na indisponibilidade deste laser, foi desenvolvido um sistema de iluminação alternativo, construído a partir de um amplificador fotográfico, substituindo a lâmpada incandescente de 100 W por uma halógena de 1000 W e incorporando um sistema de ventilação forçada, tal como mostrado na Fig. 4. A folha de luz é produzida utilizando um slide negativo preto e branco com uma fresta transparente impressa, produzido a partir de um filme de alto contraste, fotografando-se uma linha estreita impressa a laser em uma folha de papel branco.

As Figuras 5 e 6 mostram, respectivamente, as montagens experimentais para as medidas de temperatura e para a visualização do escoamento na cavidade.

Maiores informações sobre o procedimento experimental podem ser obtidas em [25].



1. Sistema de aquisição
2. Banho termostático frio
3. Cavidade
4. Banho termostático quente
5. Reservatório de gelo
6. Sistema de iluminação

Fig. 6. Foto da montagem experimental para a visualização do escoamento na cavidade.

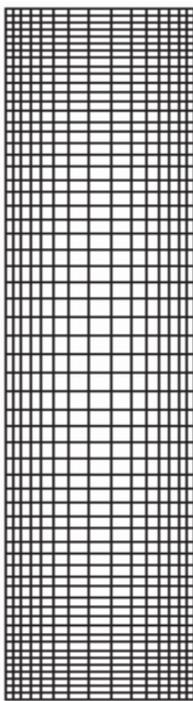


Fig. 7. Formato das malhas usadas.

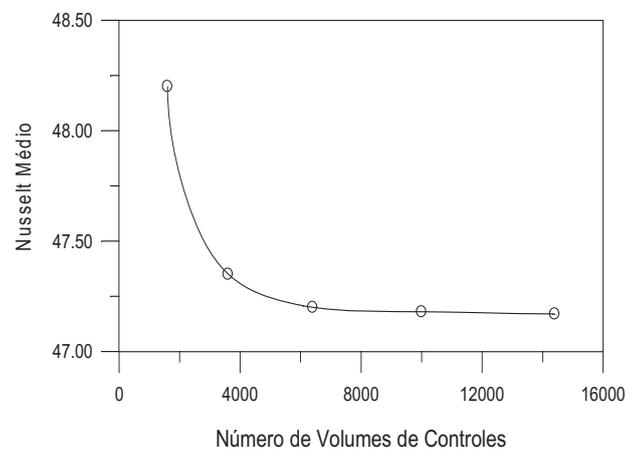


Fig. 8. Teste de malha para o caso básico.

4. RESULTADOS

Inicialmente serão apresentados os resultados do teste realizado para a escolha das malhas numéricas, considerando o caso básico e tendo como parâmetro de controle o número de Nusselt médio na parede aquecida (Nu_H).

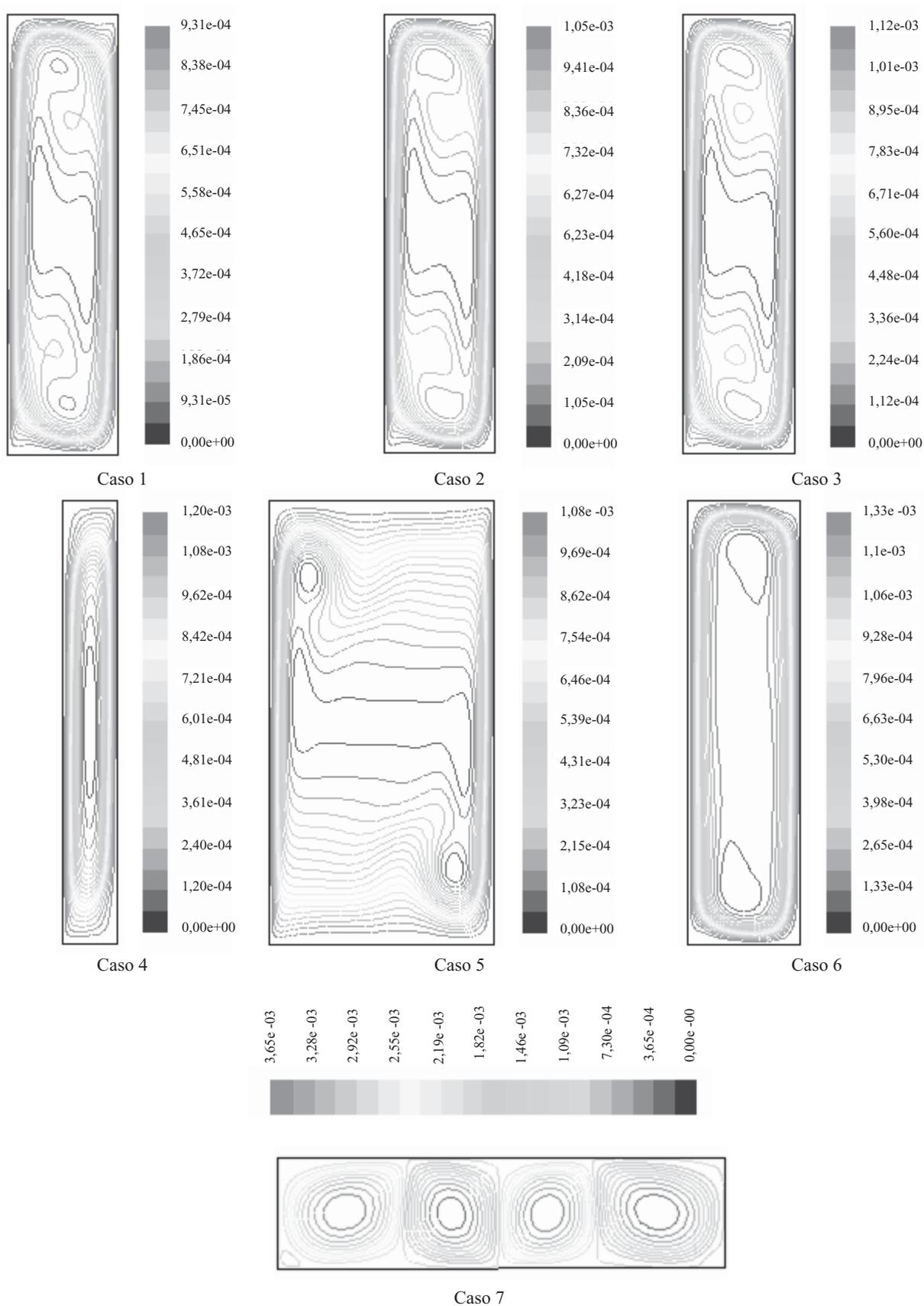


Fig. 9. Linhas de corrente obtidas numericamente para cada um dos casos considerados.

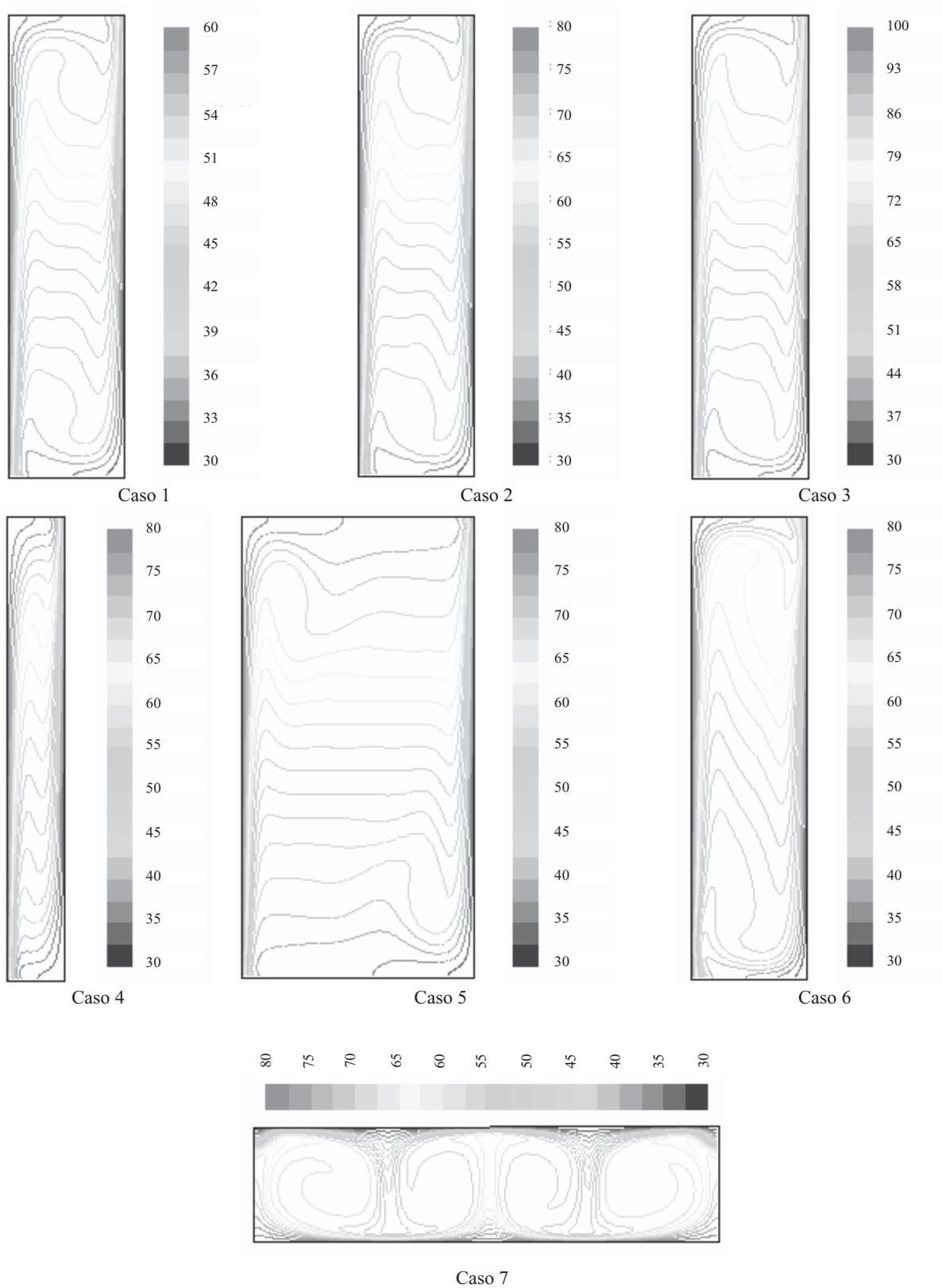


Fig. 10. Linhas isotérmicas obtidas numericamente para cada um dos casos considerados.

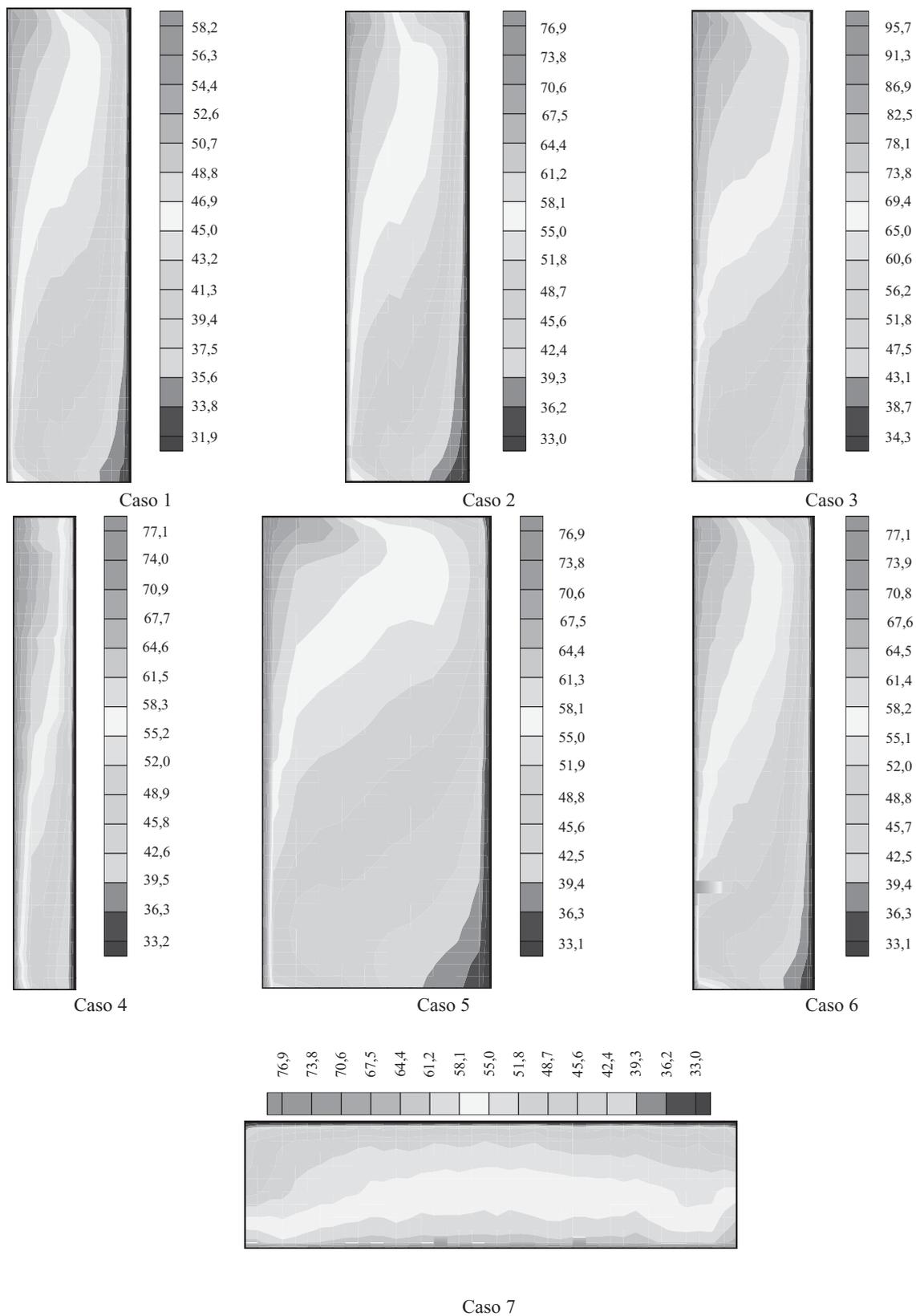


Fig. 11. Linhas isotérmicas obtidas experimentalmente para cada um dos casos considerados.

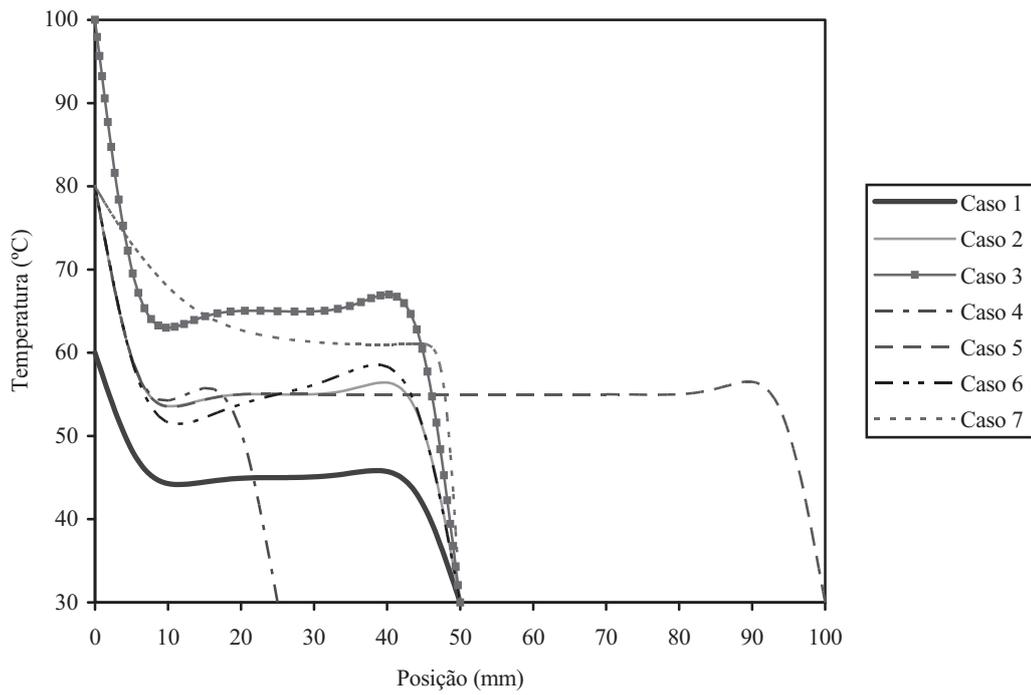


Fig. 12. Comparação entre os perfis de temperatura obtidos numericamente na altura média da cavidade.

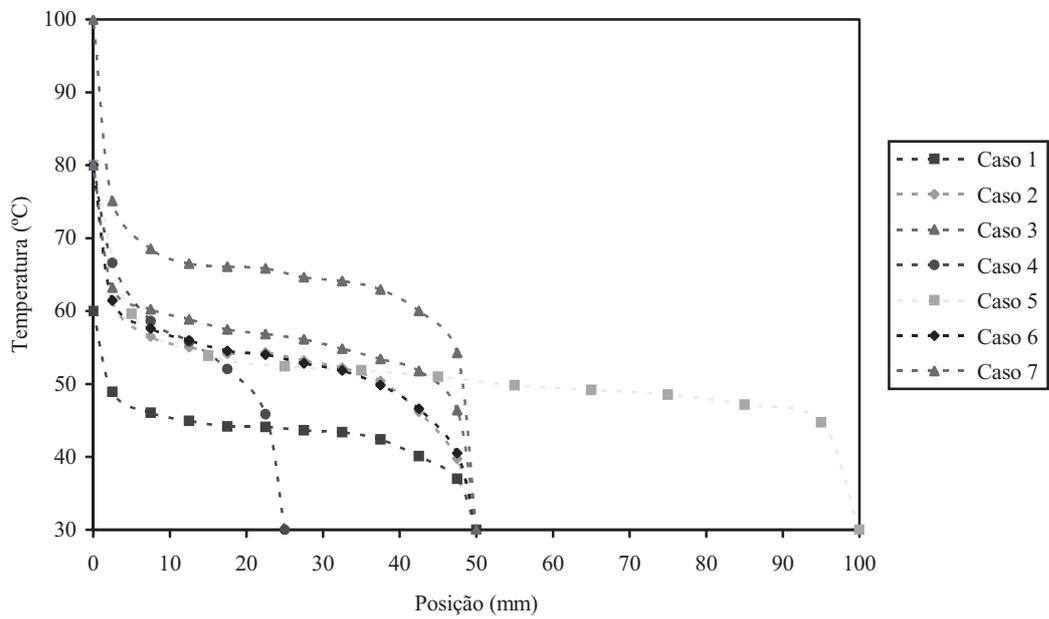


Fig. 13. Comparação entre os perfis de temperatura obtidos experimentalmente na altura média da cavidade.

Na Fig. 7 é mostrado o formato das malhas utilizadas e na Fig. 8 são apresentados os resultados do teste de malha realizado. Com base nos resultados obtidos, foi escolhida a malha 50×200 como sendo adequada para a solução numérica do caso básico (razão de aspecto 1/4) uma vez que a variação de Nu_H com relação a malha 60×240 não é significativa. Seguindo o mesmo procedimento, foram escolhidas malhas 25×200 e 100×200 para a solução dos casos com razão de aspecto 1/8 e 1/2, respectivamente.

As Figuras 9 e 10 mostram as linhas de corrente e as linhas isotérmicas obtidas numericamente e a Fig. 11 mostra os campos de temperatura obtidos experimentalmente no interior da cavidade.

As Figuras 12 e 13 mostram, respectivamente, os resultados numéricos e experimentais das distribuições de temperatura na altura média da cavidade para todos os casos apresentados na Tabela 1. As Figuras 14 e 15 comparam alguns resultados numéricos com os experimentais, para o caso básico considerado (caso 2).

5. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Em geral, através da observação das linhas de corrente e dos perfis de velocidade, bem como da visualização do escoamento, verifica-se que o fluido tem movimento circular no sentido horário, ou seja, subindo próximo a parede aquecida e descendo próximo a parede resfriada. Nota-se a ocorrência de células de recirculação menores tanto na região superior como na região inferior da cavidade e uma estagnação na região central.

As linhas isotérmicas são paralelas nas proximidades das paredes onde as temperaturas são mantidas constantes e perpendiculares nas proximidades das paredes isoladas, tendo sido observado pequeno desvio desse comportamento nos resultados experimentais em virtude da não existência de um isolamento perfeito das paredes.

Analisando-se a influência das temperaturas das paredes, verifica-se que com o aumento da diferença de temperatura entre as mesmas ocorre uma maior movimentação do ar na cavidade, aumentando-se assim as trocas de calor e, conseqüentemente, o número de Nusselt médio na parede aquecida.

Na análise da influência da razão de aspecto, nota-se que aumentando a razão de aspecto, ocorre uma diminuição das velocidades no escoamento e tem-se uma queda na transferência de calor por convecção dentro da cavidade, com a conseqüente diminuição do número de Nusselt médio na parede aquecida.

Com relação ao efeito do posicionamento da cavidade, verifica-se que existe uma melhora no processo de transferência de calor à medida que se aumenta o ângulo de inclinação da parede aquecida com relação ao plano horizontal, induzindo a um com aumento do número de Nusselt médio na parede aquecida. Há de se destacar ainda que, quando a cavidade está na posição horizontal, ocorre a formação de células de recirculação menores e com sentido de rotação alternado, ou seja, uma gira no sentido horário e outra no sentido anti-horário. Neste caso, as linhas isotérmicas mostram formações alternadas (para cima e para baixo) que lembram o formato de cogumelos, sendo originadas devido à movimentação ascendente do ar quente que está próximo a parede aquecida, que acaba provocando o movimento descendente do ar que está próximo da parede fria.

Com relação à visualização do escoamento, verificou-se que, quando se utilizou a câmera SLR 35 mm Nikon F4s, não foi possível obter boas imagens do escoamento, pois não foi possível encontrar uma relação entre o tempo de exposição e a abertura do diafragma da câmera devido à deficiência no sistema de iluminação. Com a câmera digital Sony MVC-CD250 foi possível capturar as imagens dos escoamentos mesmo com a baixa luminosidade. Acredita-se que com uma melhora do sistema de iluminação seja possível obter melhores resultados.

Em geral, pode-se verificar que existe uma certa concordância entre os resultados numéricos com os experimentais correspondentes. No caso específico do perfil de temperatura, a máxima diferença encontrada está em torno de 20%. Entre os principais motivos para que isso tenha ocorrido pode-se destacar o não perfeito isolamento da cavidade construída, o pequeno número de pontos de medida de temperatura e as hipóteses simplificadoras utilizadas para a solução numérica dos problemas.

Como sugestões para a continuidade deste trabalho pode-se, entre outras coisas, considerar na solução numérica os efeitos da variação das propriedades físicas com a temperatura, o efeito da radiação térmica, o cálculo das resistências térmicas de contato, a transferência de calor para o ambiente externo e, por fim,

para uma análise mais detalhada, considerar o escoamento tridimensional. Por outro lado, no que diz respeito à parte experimental, além da melhoria do isolamento da cavidade e do sistema de iluminação, pode-se tentar medir a temperatura no interior da cavidade de uma maneira menos intrusiva através de interferometria laser ou termografia; além da realização de medidas de velocidade, usando anemometria de filme quente com as sondas adequadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento deste trabalho e aos colegas Rodrigo Correa Campos e Giancarlo de Souza Damno pela colaboração.

REFERÊNCIAS

- [1] De Vahl Davis, G., “Natural Convection of Air in a Square Cavity: A Bench Mark Numerical Solution”, *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, **3**, 249-264 (1983)
- [2] Hiller, W.J., Koch, St., Kowalewski, T.A., Range, K., Behnia, M., De Vahl Davis, G., “Visualization of 3-D Natural Convection – Comparison with Numerical Results”, *Proceedings of 11th Brazilian Mechanical Engineering Conference*, **2**, 21-24, São Paulo, SP (1991)
- [3] Lage, J.L., Bejan, A., “The Ra-Pr Domain of Laminar Natural Convection in an Enclosure Heated from the Side”, *Numerical Heat Transfer - Part A* **19**, 21-41 (1991)
- [4] Hsieh, S.-S., Wang, C.-Y., “Experimental Study of Three-Dimensional Natural Convection in Enclosures with Different Working Fluids”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **37**(17), 2687-2698 (1994)
- [5] Leong, W.H., Hollands, K.G.T., Brunger, A.P., “Experimental Nusselt Numbers for a Cubical Cavity Benchmark Problem in Natural Convection”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **31**, 1979-1989 (1999)
- [6] Ostrach, S., “Natural Convection in Enclosures”, *Journal of Heat Transfer*, **110**, 1175-1190 (1988)
- [7] Catto, I., “Natural Convection in Enclosures”, *Proceedings of 6th International Heat Transfer Conference*, **6**, 13-30, Toronto (1978)
- [8] Sernas, V., Lee, E.I., “Heat Transfer in Air Enclosures of Aspect Ratio Less than One”, *Journal of Heat Transfer*, **103**, 617-622 (1981)
- [9] Fusegi, T., Hyun, J.M., Kuwahara, K., “Natural Convection in a Differentially Heated Square Cavity with Internal Heat Generation”, *Numerical Heat Transfer - Part A* **21**, 215-229 (1992)
- [10] Hasnaoui, M., Bilgen, E., Vasseur, P. “Natural Convection Heat Transfer in Rectangular Cavities Heated from Below”, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, **6**, 255-264 (1992)
- [11] Ravi, M.R., Henkes, R.A.W.M., Hoogendoorn, C.J., “On the High-Rayleigh Number Structure of Steady Laminar Natural Convection Flow in a Square Enclosure”, *Journal of Fluid Mechanics*, **262**, 325-351 (1994)
- [12] Hsu, T.-H., Chen, C.-K., “Natural Convection of Micropolar Fluids in a Rectangular Enclosure”, *International Journal of Engineering Science*, **34**(4), 407-415 (1996)
- [13] Hsieh, S.-S., Yang, S.-S., “Flow Structure and Temperature Measurements in a 3-D Vertical Free Convective Enclosure at High Rayleigh Number”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**(6), 1467-1480 (1997)
- [14] Upton, T.D., Watt, D.W., “Experimental Study of Transient Natural Convection in an Inclined Rectangular Enclosure”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **40**(11), 2679-2690 (1997)
- [15] Aydin, O., Unal, A., Ayhan, T., “Natural Convection in Rectangular Enclosures Heated From One Side and Cooled from the Ceiling”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **42**, 2345-2355 (1999)
- [16] Mishra, D., Muralidhar, K., Munshi, P., “Isotherms in a Horizontal Differentially Heated Cavity at Intermediate Rayleigh Numbers”, *International Communication Heat and Mass Transfer*, **26**(5), 729-738 (1999)
- [17] Tian, Y.S., Karayiannis, T.G., “Low Turbulence Natural Convection in an Air Filled Square Cavity – Part I: The Thermal and Fluid Flow Fields”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **43**, 849-866 (2000)

- [18] Ramesh, N., Venkateshan, S.P., “Experimental Study of Natural Convection in a Square Enclosure Using Differential Interferometer”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **44**, 1107-1117 (2001)
- [19] Patankar, S.V., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publ. Co., Washington, D.C. (1980)
- [20] Roache, P.J., *Computational Fluid Mechanics*, Hermosa Publishers, New Mexico (1986)
- [21] Bejan, A., *Transferência de Calor*, Ed. Edgard Blucher Ltda. (1996)
- [22] Ramos, R.A.V., Campos, R.C., “Estudo Numérico do Escoamento Convectivo em uma Cavidade Sujeita a um Gradiente de Temperatura entre as Paredes”, *Anais, XXII Congresso Ibero Latino Americano de Métodos Computacionais em Engenharia* (em CD-ROM), 18 p., Campinas, SP (2001)
- [23] Moffat, R.J., “Describing the Uncertainties in Experimental Results”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **1**, 3-17 (1988)
- [24] Yang, W.-J., *Handbook of Flow Visualization*, Ed. Taylor & Francis (1989)
- [25] Ramos, R.A.V., Takaki, A.T., Damno, G.S., “Experimental Approach to Natural Convective Fluid Flow and Heat Transfer Inside an Enclosure with Prescribed Temperature at Walls”, *Proceedings of 4th European Thermal Sciences Conference* (in CD-ROM), 10 p., Birmingham, UK (2004)

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF NATURAL CONVECTION IN DIFFERENTIALLY HEATED CAVITIES

Abstract – In this work, a numerical and experimental study of the natural convection heat transfer in a thermal cavity with one of the vertical walls cooled and its opposite wall heated, was carried out. The inferior and superior walls are insulated. It was verified the influence of the thermal gradient among the walls, the aspect ratio and inclination angle of the cavity; on the flow and the heat transfer. The numerical solution was obtained by using a computational code based on the method of finite volumes. The coupling pressure-velocity was achieved by the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) scheme. The flow was considered laminar, two-dimensional, incompressible and steady state. It was used Boussinesq hypothesis and the physical properties were considered constants. Non-uniform and structured meshes were more refined near the walls and numerical results for velocity and temperature fields were obtained, as well as the temperature profiles at medium height of the cavity. Thermocouples and a data acquisition system controlled by computer were used to realize temperature measurements and a flow visualization test with smoking trace technique was carried out. Finally, a comparison between some numerical and experimental results was performed.

Keywords – Natural convection, Thermal cavity, Flow visualization, Temperature measurement, Numerical simulation.