

## Análise de Efeitos de Convecção Mista em Cavidades com Parede Senoidal

Monique Soriano Vital da Silva e Albino José Kalab Leiroz<sup>♦</sup>

Departamento de Engenharia Mecânica – POLI/ COPPE

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Caixa Postal 68503 - Rio de Janeiro – RJ – 21945-970

monique@lmt.coppe.ufrj.br, leiroz@ufrj.br

**Resumo.** No presente trabalho a evolução transiente do campo de temperatura em cavidades quadradas bidimensionais com superfície inferior senoidal e superior deslizante é analisada. As equações de conservação são escritas em coordenadas cartesianas e resolvidas numericamente utilizando o procedimento SIMPLE para o tratamento do acoplamento velocidade-pressão. Variações de massa específica são tratadas através da aproximação de Boussinesq. Técnicas de geração numérica de malhas são utilizadas para se obter um domínio computacional uniforme. As equações são discretizadas através do Método de Diferenças Finitas usando o esquema WUDS. O sistema de equações algébricas resultante é resolvido usando um método iterativo com sub-relaxação e controle local de erro. As influências do número de ondulações na superfície irregular e dos números de Reynolds e Grashof são estudadas na evolução do campo de temperatura no interior das cavidades. Os resultados mostram o aparecimento de recirculações, influenciadas pela irregularidade da superfície.

*Palavras chave:* escoamento em Cavidades, Convecção Mista, Métodos Numéricos e Geração de Malhas.

### 1. Introdução

A análise de escoamentos e da transferência de calor em cavidades fechadas possui interesse prático relacionado às diversas aplicações industriais, que incluem resfriamento de equipamentos eletrônicos, revestimento de superfícies e geradores de vapor, onde estes escoamentos se encontram presentes (Abreu, 2001). Além deste aspecto de interesse prático, escoamentos confinados em cavidades têm sido utilizados para o estudo de fenômenos físicos básicos, uma vez que apresentam em uma geometria simples diversas estruturas de escoamento, tais como vórtices, escoamentos secundários e fenômenos associados a instabilidade hidrodinâmica.

O estudo numérico dos campos de velocidade e de temperatura é realizado em uma cavidade com tampa deslizante e parede inferior irregular, utilizando a formulação Vorticidade-Função Corrente e o Método de Diferenças Finitas (Abreu, 2003). Resultados mostraram que os perfis de velocidade e de temperatura foram influenciados pela combinação dos efeitos de convecção forçada induzidos pelo movimento horizontal da parede superior e pelo formato irregular da parede inferior. Resultados também mostraram o desenvolvimento de zonas de recirculação nos campos de velocidade e nos perfis de temperatura influenciados pela parede irregular (Abreu, 2003).

Um estudo numérico dos efeitos da parede irregular aquecida na convecção natural, em uma cavidade quadrada inclinada com aquecimento não homogêneo é realizado (Adjlout, 2002). A formulação Vorticidade-Função Corrente, o Método de Diferenças Finitas é utilizada, e a variação de massa específica é tratada através da aproximação de Boussinesq. Os resultados obtidos para diferentes ângulos de inclinação e diferentes números de Rayleigh, mostram que o escoamento e a transferência de calor são afetados pela ondulação na parede aquecida. Conseqüentemente, uma ondulação característica é obtida na distribuição do número de Nusselt local resultando na diminuição da taxa de transferência de calor, comparada com a da cavidade quadrada regular (Adjlout, 2002).

A convecção natural em uma cavidade bidimensional com três paredes planas e uma parede irregular é também numericamente estudada. Utilizou-se na parede superior um perfil de temperatura senoidal, enquanto as outras paredes se mantinham resfriadas. O problema foi resolvido através do algoritmo de SIMPLE com esquema QUICK, e as equações discretizadas usando o Método de Volumes Finitos. O estudo foi conduzido para inclinações de  $\theta$  à  $2\pi$  em intervalos de  $\pi/6$ . Resultados mostram que o ângulo de inclinação afeta o escoamento e a taxa de transferência de calor na cavidade. Com o aumento da amplitude, o número de Nusselt médio na parede irregular é alto para os casos de baixos números de Rayleigh (Dalal, 2005).

Transferência de calor por convecção em meios porosos tem o interesse de engenheiros e de cientistas das áreas de química, civil, ambiental, mecânica, aeroespacial, engenharia nuclear, aplicações matemáticas entre outras. Este interesse é estimulado pelo fato de que escoamentos e a transferência de calor em meios porosos são de aplicações práticas na indústria moderna (Misirlioglu, 2005). A convecção natural em cavidades com paredes verticais irregulares e completa de fluido não-saturado foi investigada numericamente. A irregularidade das paredes verticais é descrita através de uma função cosseno. As equações de Darcy e de energia são resolvidas numericamente usando o Método de Elementos Finitos. A análise indicou que para elevados números de Rayleigh ( $Ra=1000$ ), moderadas razões de aspecto ( $A<3$ ) e amplitude igual a 0.5, o número de Nusselt local ao longo das paredes verticais torna-se negativo, ou seja, o

<sup>♦</sup> Autor para o qual a correspondência deve ser endereçada.

calor gerado no interior do meio poroso não é transferido através dos poros da parede aquecida para a parede resfriada (Misirlioglu, 2005).

Canais com paredes rugosas são empregados para o aumento da taxa de transferência de calor em processos industriais (Wang, 2002). O primeiro trabalho analítico envolvendo o problema de escoamento viscoso em canais com paredes irregulares foi tratado por Burns e Parks em 1967, que expressaram a função corrente em termos de série de Fourier para condições de escoamento de Stokes. Um trabalho experimental utilizando naftalina para a obtenção do coeficiente de transferência de calor local e médio, em um canal com paredes com rugosidade triangular (Goldstein, 1977) é realizado. Sannei e Dini em 1993, estudam experimentalmente as características da transferência de calor em regime turbulento em canais com paredes rugosas (Wang, 2002).

A taxa de transferência de calor para escoamentos através de um canal com paredes sinuosas é analisado usando um método simples de transformação de coordenadas e o esquema implícito ADI (*Alternating-Direction Implicit*). Os resultados obtidos mostram que ocorre um aumento na amplitude do número de Nusselt e no coeficiente de fricção, causado pelo aumento do número de Reynolds e pelo raio de amplitude da rugosidade. O aumento da transferência de calor não se mostra significativo para raios de amplitude baixos, contudo, para valores suficientemente elevados dessa amplitude, o canal rugoso poderia ser um dispositivo de transferência de calor, especialmente para números de Reynolds elevados (Wang, 2002).

Superfícies estendidas são utilizadas em trocadores de calor compactos. Placas geometricamente modificadas são incorporadas junto ao aumento da área da superfície do trocador de calor, aumentando também o coeficiente de transferência de calor por convecção. Placas irregulares são usadas pela simplicidade de industrialização, potencial para o aumento da performance hidráulica-térmica e facilidade de uso em trocadores em placas ou em tubos (Zhang, 2004).

A influência da geometria senoidal das placas no escoamento laminar do ar e a transferência de calor convectiva nas aletas de uma canal é computacionalmente investigada. Para o problema de transferência de calor, as superfícies das placas são mantidas a uma temperatura uniforme, a qual representa as condições de refrigeração do ar ou escoamento turbulento líquido de trocadores líquido-ar. Os resultados sugerem dois escoamentos distintos. Para baixos números de Reynolds ( $Re=10$ ) apresenta desenvolvimento total das linhas de corrente, e para elevados valores de Reynolds ( $Re=1000$ ) o regime é caracterizado por vórtices laterais ao longo das rugosidades (Zhang, 2004).

O presente trabalho apresenta a solução numérica para o campos de velocidade e de temperatura, para o escoamento incompressível no interior de uma cavidade bidimensional com parede inferior irregular e parede superior deslizante. A influência das forças de corpo e dissipação viscosa são desprezadas. As equações de conservação são discretizadas através do Método de Diferenças Finitas usando o esquema WUDS, a variação de massa específica é tratada pela aproximação de Boussinesq que acopla as equações de conservação de quantidade de movimento à de energia, e o método SIMPLE é usado para o acoplamento pressão-velocidade. Inicialmente, um procedimento numérico é aplicado para obter uma malha discretizada que permite o tratamento do domínio irregular e controle dos pontos da malha. O sistema de equações algébricas resultante é resolvido usando um método iterativo com sub-relaxação e controle local de erro. As influências do número de ondulações na superfície irregular e dos números de Reynolds e Grashof são estudadas na evolução do campo de temperatura no interior das cavidades. Os resultados mostram o aparecimento de recirculações, influenciadas pela irregularidade da superfície.

## 2. Análise

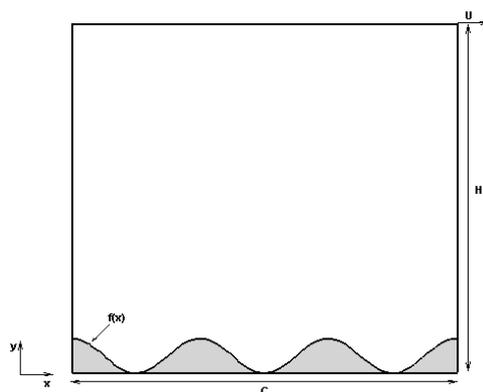


Figura 1. Domínio Físico e sistema de coordenadas

O esboço do domínio físico é mostrado na Fig.1, juntamente com o sistema de coordenadas utilizado e as principais dimensões da cavidade. A cavidade considerada no trabalho possui a parede inferior irregular descrita por uma função  $f(x)$  e movimento horizontal na parede superior com velocidade de deslocamento constante  $U$ .

No presente trabalho, efeitos de variação de massa específica são considerados. Os perfis de temperatura são influenciados pela combinação da convecção forçada induzida pelo movimento da parede deslizante e da convecção

natural proveniente do gradiente de massa específica causado pelo diferencial de temperatura imposto pelas condições de contorno aplicadas. A influência da variação de massa específica provocada pelos gradientes de temperatura é considerada através da aproximação de Boussinesq. A partir destas hipóteses as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e de energia, em forma adimensional, podem ser escritas em coordenadas cartesianas como

$$r_a \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x r_a \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -r_a \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( r_a^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x r_a \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} = -r_a \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re} \left( r_a^2 \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + r_a \frac{Gr}{Re^2} \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_x r_a \frac{\partial \theta}{\partial x} + u_y \frac{\partial \theta}{\partial y} = \frac{1}{Re Pr} \left( r_a^2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

com condições de contorno

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \theta = 0 \quad ; \quad x = 0, \quad f(x) < y < H \quad (5)$$

$$u_x = U, \quad u_y = 0, \quad \theta = 0 \quad ; \quad 0 < x < 1/r_a, \quad y = H \quad (6)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \theta = 1 \quad ; \quad x = 1/r_a, \quad f(x) < y < H \quad (7)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \theta = 0 \quad ; \quad 0 < x < 1/r_a, \quad y = f(x) \quad (8)$$

e condições iniciais de fluido estagnado e isotérmico expressas por

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \theta = 0 \quad ; \quad 0 \leq x \leq 1/r_a, \quad f(x) \leq y \leq H \quad (9)$$

As variáveis adimensionais são definidas considerando  $C$  como comprimento característico,  $H$  como altura característica, e a velocidade na parede superior,  $U$ , como velocidade característica. A temperatura é adimensionalizada em termos da temperatura inicial do fluido,  $T_0$ , e da temperatura do fundo,  $T_f$ , que depende da condição empregada para esse contorno. Dessa forma as variáveis adimensionais são definidas como,

$$r_a = \frac{H}{C}, \quad x = \frac{x^*}{C}, \quad y = \frac{y^*}{H}, \quad t = \frac{t^* U}{H}, \quad u_x = \frac{u_x^*}{U}, \quad u_y = \frac{u_y^*}{U}, \quad p = \frac{p^*}{\rho U^2}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_f - T_0} \quad (10)$$

e os parâmetros adimensionais são definidos como,

$$r_a = \frac{H}{C}, \quad Re = \frac{HU}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Gr = \frac{g\beta H^3}{\nu^2} (T_f - T_0), \quad Bi = \frac{hH}{\kappa} \quad (11)$$

onde  $\alpha$  é a difusividade térmica,  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $\kappa$  é a condutividade térmica,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\beta$  é o termo de expansão volumétrica.

O acoplamento pressão-velocidade é tratado a partir do método SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations). Este método é baseado em iterações de aproximação-correção para resolver as equações de conservação. As componentes de velocidade são obtidas das equações de conservação de quantidade de movimento usando um campo de pressão estimado. O campo de pressão e de velocidade são então corrigidos de modo a satisfazer a equação de continuidade.

Assim, a pressão e as velocidades são escritas como

$$p = p_0 + p' \quad (12)$$

$$u = u_0 - \frac{1}{A_p} \frac{\partial p'}{\partial x} \quad (13)$$

$$v = v_0 - \frac{1}{A_p} \frac{\partial p'}{\partial y} \quad (14)$$

onde  $p_0$ ,  $u_0$ ,  $v_0$  são os valores estimados de pressão e de velocidades em  $x$  e  $y$ , respectivamente, e  $A_p$  é o coeficiente definido por

$$A_p = \frac{1}{dt} + \frac{2}{dx^2 Re} + \frac{2}{dy^2 Re} \quad (15)$$

Substituindo as Eqs.(13-14) na equação de conservação da massa obtemos a Equação de Poisson para Pressão, descrita na Eq.(16), utilizada para obtermos os valores de pressão aproximados.

$$r_a^2 \frac{\partial^2 p'}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p'}{\partial y^2} = A_p \left( \frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} \right) \quad (16)$$

### 3. Aspectos Numéricos

Devido aos elevados gradientes nos perfis de velocidade e de temperatura esperados nas regiões próximas as paredes sólidas, o procedimento de geração de malha contempla a concentração de pontos e o controle de ângulo da malha nessas regiões, como forma de controlar o custo computacional na simulação numérica. Este procedimento de geração de malha tem como característica transformar o domínio físico irregular em um domínio computacional regular.

Inicialmente, uma transformação de coordenadas analítica é introduzida ao longo das paredes sólidas com o objetivo de concentrar pontos da malha próximos a estas paredes domínio, onde os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  permitem o controle da localização da concentração e o controle da intensidade da concentração, respectivamente (Anderson, 1984).

- Paredes Esquerda e Direita

$$x = \xi \quad (17)$$

$$y = H \frac{(\beta + 2\alpha) [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\eta - \alpha)/(1 - \alpha)} - \beta + 2\alpha}{(2\alpha + 1) \left\{ 1 + [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\eta - \alpha)/(1 - \alpha)} \right\}} \quad (18)$$

- Parede Superior

$$x = C \frac{(\beta + 2\alpha) [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\xi - \alpha)/(1 - \alpha)} - \beta + 2\alpha}{(2\alpha + 1) \left\{ 1 + [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\xi - \alpha)/(1 - \alpha)} \right\}} \quad (19)$$

$$y = \eta \quad (20)$$

- Parede Inferior

$$x = C \frac{(\beta + 2\alpha) [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\xi - \alpha)/(1 - \alpha)} - \beta + 2\alpha}{(2\alpha + 1) \left\{ 1 + [(\beta + 1)/(\beta - 1)]^{(\xi - \alpha)/(1 - \alpha)} \right\}} \quad (21)$$

$$y = f(x) \quad (22)$$

para  $\alpha = 0.5$  a concentração da malha é feita igualmente para  $0 < x < C$  e  $f(x) < y < H$ .

Uma vez definida ao longo da superfície, a relação entre as coordenadas físicas  $(x, y)$  e as coordenadas transformadas  $(\xi, \eta)$  deve ser estabelecida para o interior do domínio de solução. Esta relação entre coordenadas é escrita na forma diferencial como (Hoffman, 1992),

$$\nabla^2 \xi = P(\xi, \eta) \quad (23)$$

$$\nabla^2 \eta = Q(\xi, \eta) \quad (24)$$

A solução numérica das Eqs.(23-24) permite ainda o cálculo da métricas dessas transformações. As funções  $P(\xi, \eta)$  e  $Q(\xi, \eta)$  são utilizadas para o controle de pontos entre o interior e os contornos da malha, respectivamente. Um procedimento iterativo é usado na determinação de  $P(\xi, \eta)$  e  $Q(\xi, \eta)$  a partir de valores estabelecidos para ângulo e

espaçamento entre linhas de coordenadas transversais, da malha no domínio físico (Hoffman, 1992). Inicialmente, as Eqs. (23-24) são resolvidas numericamente considerando  $P(\xi, \eta)$  e  $Q(\xi, \eta)$  nulos e utilizando, como condições de contorno, a distribuição de pontos estabelecida analiticamente ao longo das paredes da cavidade. Com os resultados obtidos, o espaçamento e o ângulo da malha são comparados com valores estabelecidos. A partir desta comparação, os valores corrigidos para  $P(\xi, \eta)$  e  $Q(\xi, \eta)$  nos contornos podem ser determinados. Em seguida, os valores dessas funções são extrapolados para o interior do domínio de solução, utilizando as funções exponenciais definidas nas Eqs.(25-26) (Hoffman, 1992).

$$P(\xi, \eta) = P(\xi, 1)e^{-a(\eta-1)/(\eta_{max}-1)} + P(\xi, \eta_{max})e^{-b(\eta_{max}-\eta)/(\eta_{max}-1)} \quad (25)$$

$$Q(\xi, \eta) = Q(\xi, 1)e^{-c(\eta-1)/(\eta_{max}-1)} + Q(\xi, \eta_{max})e^{-d(\eta_{max}-\eta)/(\eta_{max}-1)} \quad (26)$$

onde  $a, b, c, d$ , são denominados parâmetros de decaimento das equações.

Utilizando as métricas obtidas da transformação descrita, as Eqs. (2-9,16) são reescritas em termos das variáveis  $\xi$  e  $\eta$ , e discretizadas através do Método de Diferenças Finitas usando o esquema WUDS (Weighted Upstream Differencing Scheme). O sistema de equações algébricas resultante do processo de discretização é resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel, com sub-relaxação e controle local de erro. As simulações numéricas foram executadas utilizando uma malha de 81 pontos em cada direção, com tolerância de  $10^{-4}$  no processo iterativo e passo no tempo de  $10^{-3}$ . Os parâmetros de sub-relaxação adotados foram de 0.8 para iterações do campos de velocidade e de pressão, 0.6 para o campo de temperatura. O código numérico desenvolvido foi inicialmente validado a partir do problema de cavidades com parede deslizante (Anderson, 1984) considerando parede inferior regular.

A Fig.2 apresenta a malha obtida a partir do procedimento descrito anteriormente considerando o espaçamento próximo as paredes superior e inferior sendo  $0.25\Delta\eta$ , o ângulo das linhas transversais da malha a essas superfícies como  $\pi/2$  e  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$ .

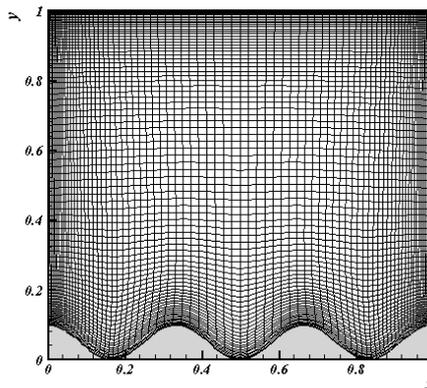


Figura 2. Malha no domínio físico com  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$ , 81x81 pontos,  $a=30, b=0.5, c=12$  e  $d=10$ .

#### 4. Resultados

Nesta seção são analisados os resultados obtidos a partir das simulações numéricas realizadas, com o objetivo de avaliar a influência da irregularidade da parede inferior e do movimento horizontal da parede superior sob o comportamento dos campos de velocidade e de temperatura. Os resultados são apresentados para diferentes números de Reynolds, 1, 100, para os casos de convecção forçada,  $Gr = 0$ , e de convecção mista,  $Gr = 10^3$ .

A Fig.3 apresenta os resultados de função corrente e de temperatura para o caso de convecção forçada ( $Gr = 0$ ) e  $Re = 1$ . Observa-se uma simetria em relação ao eixo  $y$  no campo de temperatura, mostrando assim que o processo de transferência de calor é predominantemente difusivo, Fig.3b. A influência da parede irregular no escoamento e no processo de transferência de calor é observada nas regiões próximas à essa parede. Além disso, o comportamento do fluido não é afetado pela parede irregular na região superior da cavidade.

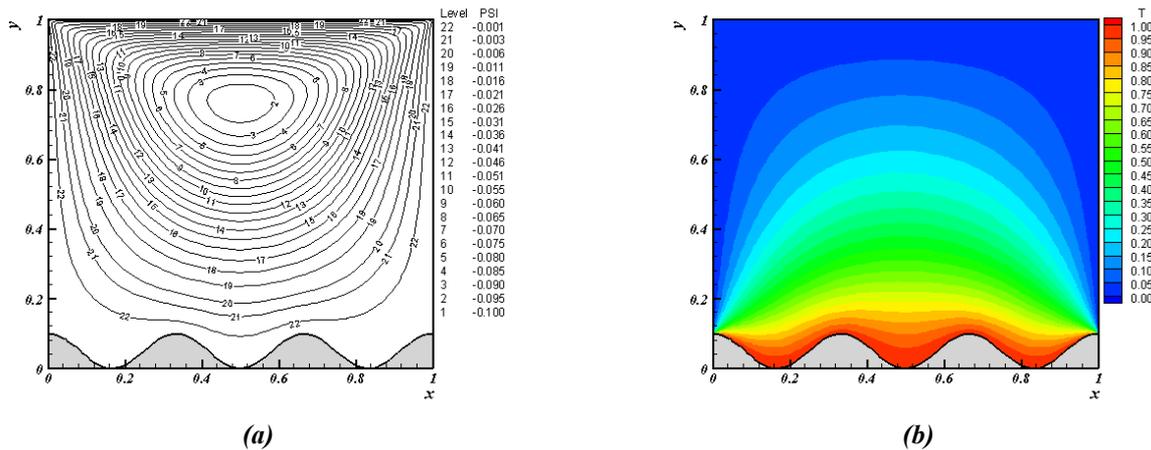


Figura 3. Campos de Velocidade para Função Corrente (a) e de Temperatura (b) com  $Re = 1$ ,  $Gr = 0$ ,  $Pr = 1$  e  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$

Podemos observar, a partir do resultado apresentado na Fig.4a, para o caso de convecção forçada e  $Re = 100$ , um deslocamento do vórtice principal na direção do movimento horizontal da parede superior. Este comportamento se deve ao aumento do número de Reynolds, que acarreta no aumento da tensão de cisalhamento na região próxima a essa parede. O fluxo ascendente de massa causado pelo movimento da parede superior, provoca um desenvolvimento térmico mais intenso na região próxima a parede esquerda da cavidade, conforme mostra a Fig.4b. Diferentemente do caso de  $Re = 1$ , observamos um aspecto assimétrico no campo de temperatura, devido ao fluxo descendente de massa, a temperatura menos aquecida, localizado próximo a parede direita da cavidade, dificultando o desenvolvimento do campo de temperatura nessa região.

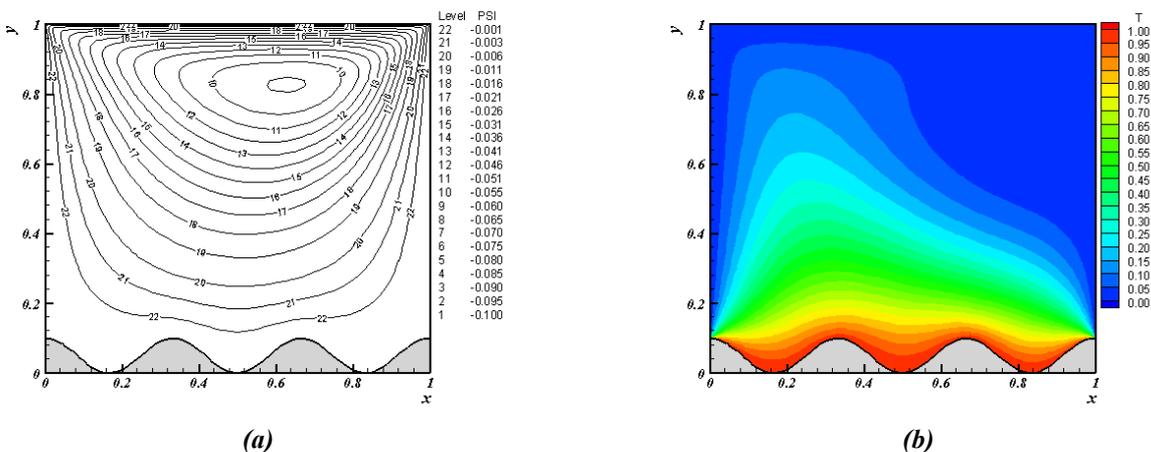


Figura 4. Campos de Velocidade para Função Corrente (a) e de Temperatura (b) com  $Re = 100$ ,  $Gr = 0$ ,  $Pr = 1$  e  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$

Os resultados de convecção mista são apresentados nas Figs.5 e 6, para os casos de  $Re = 1$  e  $100$ , respectivamente, na forma de função corrente (a) e de isotermas (b). Observou-se que a influência da variação de massa específica foi mais significativa no caso de  $Re = 1$ . O acoplamento da velocidade e da temperatura determinado pela aproximação de Boussinesq, causou o aparecimento de vórtices secundários nas regiões próximas a parede irregular, Fig.5a. Além disso, o deslocamento do vórtice principal é devido ao fluxo ascendente de massa, a temperatura mais aquecida, nas regiões próximas a parede esquerda. Este comportamento também provoca a assimetria em relação ao eixo  $y$ , no campo de temperatura, Fig.6b, mostrando assim que o processo de transferência de calor, no interior da cavidade, é convectivo.

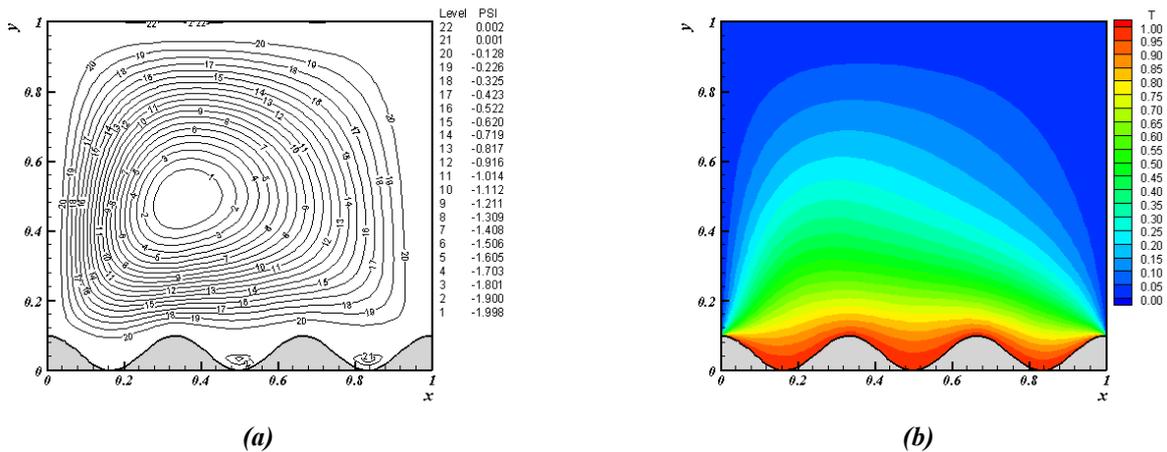


Figura 5. Campos de Velocidade para Função Corrente (a) e de Temperatura (b) com  $Re = 1$ ,  $Gr = 10^3$ ,  $Pr = 1$  e  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$

O aumento do número de Reynolds,  $Re = 100$ , Fig.6a, proporcionou o aparecimento de vórtices secundários nas regiões próximas a parede irregular, comparados com o caso de  $Re = 1$ . Os resultados mostram ainda que a influência da convecção natural não é significativa sobre o processo de transferência de calor, resultando em uma semelhança entre os perfis de temperatura, Figs.4b e 6b.

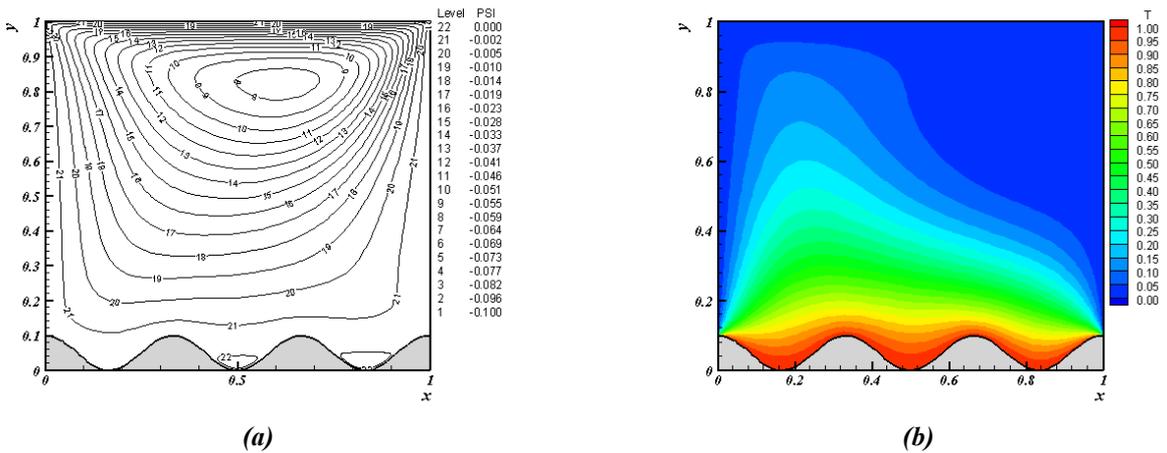


Figura 6. Campos de Velocidade para Função Corrente (a) e de Temperatura (b) com  $Re = 100$ ,  $Gr = 10^3$ ,  $Pr = 1$  e  $f(x) = 0.05(1 + \cos(6\pi x))$

## 5. Conclusões

O desenvolvimento dos campos de velocidade e de temperatura foi apresentado e discutido no presente trabalho, com o intuito de avaliá-los em uma cavidade quadrada sob a influência do movimento horizontal na parede superior e da irregularidade na parede inferior, além dos parâmetros adimensionais  $Re$  e  $Gr$ . Resultados apresentados para convecção forçada e mista e  $Re = 1, 100$ , mostram que a influência da parede irregular se mantém em regiões nas suas proximidades. O aumento do número de Reynolds,  $Re = 100$ , no caso de convecção forçada, influenciou tanto no campo de velocidade quanto no processo de transferência de calor, comparado ao caso de  $Re = 1$ . Aumentando-se o número de Grashof,  $Gr = 10^3$ , observou-se o aparecimento de vórtices secundários nas regiões próximas a parede irregular. Além da variação de massa específica acarretar na assimetria em relação ao eixo  $y$ , tanto no campo de velocidade quanto no campo de temperatura.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo financiamento para a realização do trabalho, e ao Laboratório de Máquinas Térmicas da COPPE/UFRJ pela disponibilização de recursos computacionais.

## 7. Referências

- Abreu, A.A., Leiroz, A.J.K., 2001, "Geração Numérica de Malha para Análise de Cavidades com Parede Irregular", Proceedings of COBEM 2001.
- Abreu, A.A., Leiroz, A.J.K., 2003, "Forced Convection in Driven-Lid Square Cavities with Irregular Walls", Proceedings of COBEM 2003.
- Adjout, L. et al., 2002, "Laminar Natural Convection in an Inclined Cavity with a Wavy Wall", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 45, pp. 2141-2152.
- Anderson, D.A. et al., 1984, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Burns, J.C., Parks, T., 1967, Journal of Fluid Mechanics, v.29, pp.405-416.
- Dalal, A., Das, M.K., 2005, "Laminar Natural Convection in an Inclined Complicated Cavity with Spatially Variable Wall Temperature", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 3833-3854.
- Goldstein, J.L., Sparrow, E.M., 1977, ASME Journal of Heat Transfer, v.99, pp.187.
- Hoffman, J.D., 1992, "Numerical Methods for Engineers and Scientists", McGraw-Hill.
- Misirlioglu, A. et al., 2005, "Free Convection in a Wavy Cavity Filled with a Porous Medium", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 48, pp. 1840-1850.
- Saniei, N., Dini, S., 1993, ASME Journal of Heat Transfer, v.115, pp.788.
- Wang, C.C., Chen, C.K., 2002, "Forced Convection in a Wavy-Wall Channel", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 45, pp. 2587-2595.
- Zhang, J. et al., 2004, "Effects of Fin Waviness and Spacing on the Lateral Vortex Structure and Laminar Heat Transfer in a Wavy-Plate-Fin Cores", International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 47, pp.1719-1730.

### STUDY OF MIXED CONVECTION EFFECTS IN LID-DRIVEN CAVITIES WITH SENOIDAL WALL

Monique Soriano Vital da Silva e Albino José Kalab Leiroz  
Departamento de Engenharia Mecânica – POLI/ COPPE  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Caixa Postal 68503 - Rio de Janeiro – RJ – 21945-970  
monique@lmt.coppe.ufrj.br, leiroz@ufrj.br

#### Abstract

The transient evolution of the temperature field inside two-dimensional lid-driven cavities with an irregular wall is discussed in the present work. The momentum and energy governing equations are written in Cartesian coordinate and are solving using SIMPLE method to pressure-velocity linkage. Density variations are considered by the use of Boussinesq approximation. Initially, the irregular physical solution domain is transformed into a regular computational domain using a numerical grid generation technique, allowing clustering of points within solution high gradient region and the control of grid line angles near the domain solid boundaries. The transformed governing equations are discretized using the Finite Difference Method. The resulting algebraic system is solved by an iterative solution method with sub-relaxation and local error control. The parametric study is present based on the Reynolds and Grashof numbers influence on the transient evolution of the temperature field inside the cavity. Results show the development of recirculation zones within the temperatures profiles influenced by the irregular surface.

Keywords: Cavity Flow, Mixed Convection, Numerical Methods and Grid Generation.