

## CAMPOS DE VELOCIDADE E DE TEMPERATURA NO INTERIOR DE CAVIDADES COM CONTORNO EM MOVIMENTO ALTERNATIVO

**Monique Soriano Vital, José Carlos César Amorim**

Instituto Militar de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais  
22290-270 – Rio de Janeiro – RJ  
monique@lmt.coppe.ufrj.br , jcamorim@ime.eb.br

**Albino José Kalab Leiroz**

Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21945-970 – Rio de Janeiro – RJ  
leiroz@ufrj.br

**Resumo.** A evolução dos campos de velocidade e de temperatura em cavidades bidimensionais com movimento alternativo de parede é discutido no presente trabalho. A existência de aberturas na parede estacionária é considerado. As equações de conservação de massa, quantidade de movimento são escritas em coordenadas cartesianas utilizando a formulação Vorticidade-Função Corrente, para a descrição do campo de escoamento. Condições de contorno apropriadas para a Função Corrente são utilizadas para descrever o movimento alternativo da parede e as aberturas posicionadas ao longo da parede estacionária superior. Valores para a Vorticidade ao longo dos contornos sólidos e das aberturas são determinados utilizando um método iterativo de solução. Uma transformação analítica de coordenadas é utilizada de forma a obter um domínio computacional estacionário. As equações de conservação são discretizadas através do Método de Diferenças Finitas. O sistema de equações algébricas resultante é resolvido por método iterativo com sub-relaxação e controle local de erro. A influência dos parâmetros adimensionais, como números de Reynolds e Prandtl, na evolução do escoamento e da temperatura no interior da cavidade é estudada. Os resultados mostram uma intensificação das zonas de recirculação com o aumento de Reynolds, influenciando assim na transferência de calor para as cavidades em estudo.

*Palavras chave:* Escoamento em Cavidades, Convecção, Métodos Numéricos, Geração de Malhas.

### 1. INTRODUÇÃO

Estudos do escoamento e da transferência de calor em cavidades fechadas, gerados pelo movimento de uma ou mais superfícies sólidas, têm sido de interesse não somente da área aplicada como também no campo científico. Esse interesse pode ser explicado pela presença, em uma geometria simples, de vários fenômenos físicos que ocorrem em fluidos, tais como escoamentos secundários e vórtices. O interesse por simulações numéricas para a análise desses fenômenos mostram-se também importantes, uma vez que soluções puramente analíticas se encontram restritas ao caso limite de  $Re = 0$ , caracterizado como Escoamento de Stokes (Shankar, 2000).

O desenvolvimento do campo de temperatura em câmaras de combustão de máquinas de compressão rápida e em gases durante a reação de combustão depois da parada do pistão também têm sido tema de interesse para estudos de pré-ignição em motores de combustão interna (Clarkson, 2001). Um dos trabalhos experimentais realizados explorando esse tema, utilizou gás no interior de um cilindro fechado em condições reativas e não reativas. Os resultados mostram que o efeito de cisalhamento no fluido causou o deslocamento de gases menos aquecidos da parede para o centro do cilindro acarretando um desenvolvimento mais lento da reação de combustão nesta região, em comparação com outros locais do cilindro. A técnica experimental se mostrou inapropriada para demonstrar a presença da zona de resfriamento durante a compressão, tornando assim necessário o uso da técnica de fluorescência (Clarkson, 2001).

Para motores de combustão interna, o processo de transferência de calor nas paredes é importante para satisfazer aspectos de interesse prático como, emissão de poluentes, a durabilidade dos componentes e a eficiência. Um trabalho experimental e teórico foi realizado com objetivo de estudar o processo de transferência de calor transiente entre um gás não reativo e a parede no final de um canal durante o processo de compressão do pistão (Nikanjam, 1978). Um fino filme de platina foi utilizado para medir a temperatura da parede durante este processo. A transferência de calor baseada nas equações de camada limite laminar e a trajetória do pistão apresentaram boa concordância com o fluxo de calor obtido da análise de condução no sólido. Os resultados foram obtidos para Ar e Argônio e mostraram para o coeficiente de transferência de calor, uma variação não monotônica com respeito ao tempo (Nikanjam, 1978).

Realizou-se um estudo numérico do isolamento térmico de uma cavidade bidimensional aberta limitada por um jato de ar na parte superior, com parede inferior isotérmica e verticais adiabáticas (Besbes, 2000). O método de diferenças finitas baseado na formulação vorticidade-função corrente é desenvolvido para resolver as equações de Navier-Stokes e a equação de conservação de energia. Os resultados ressaltaram que se a convecção mista for dominante, o jato quente lançado pelo bocal difunde para o ambiente externo, e conseqüentemente a cavidade não pode ser corretamente isolada.

Porém, o uso de uma zona de aspiração melhoraria o isolamento. Para convecção forçada dominante a troca de calor entre o interior da cavidade e o ambiente pode ser evitada, conservando assim a barreira hidrodinâmica, devido a operação com alta velocidade de injeção do jato de ar (Besbes, 2000).

Processos convectivos onde efeitos dos campos de temperatura e concentração se encontram presentes apresentam importância para o crescimento de cristais (Kamotani, 1984). A medida que se busca a obtenção de cristais de melhor qualidade, essa importância tem sido aumentada (Kamotani, 1984). Uma investigação experimental da convecção natural em uma cavidade rasa retangular com temperatura prescrita nas paredes verticais e demais isoladas e gradientes de concentração foi desenvolvida com o objetivo de analisar os efeitos desses gradientes de concentração impostos. Usando uma técnica eletroquímica baseada em difusão controlada por eletrodos reativos, criou-se os gradientes de concentração. Os gradientes de temperatura e concentração foram estabelecidos de forma que seus efeitos fossem concorrentes ou cooperativos (Kamotani, 1984).

Muitas aplicações de Engenharia envolvem escoamentos em domínios com fronteiras móveis. Processos de compressão e expansão de gases por êmbolos pistão no interior de cilindros são exemplos típicos dessas aplicações. A análise numérica desses escoamentos requer que técnicas de deformação de malhas sejam desenvolvidas e aplicadas, de forma a acomodar a variação do volume durante tais processos. Pode-se destacar duas abordagens aplicadas a análise de domínios com fronteiras móveis. No primeiro tipo, o movimento é estudado através de malhas fixas geradas a cada instante de tempo. Técnicas de interpolação são utilizadas para transferir informação entre malhas de instante de tempo consecutivos. Essa abordagem não é adequada para escoamentos que envolvem grandes taxas de deformações do domínio durante o movimento do pistão no cilindro. O segundo tipo, utiliza um método de geração de malhas que produz uma malha que se deforma com o movimento do pistão, de forma a acomodar a variação do volume durante o processo de compressão e expansão. Esta aproximação permite grandes taxas deformações do volume, sendo extremamente usada em simulações numéricas envolvendo esse tipo de problema.

Um método de solução transiente para escoamentos compressíveis durante o processo de compressão e expansão do pistão no interior de um cilindro foi apresentado (Cheng & Hung, 2000). O esquema é baseado no esquema de correção de pressão em dois estágios e as equações de discretizadas são derivadas da integração das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia, no movimento da malha, a qual é deformada para acomodar o movimento do pistão. Os resultados mostraram que o método de correção de pressão pode ser incorporado satisfatoriamente à técnicas numéricas já existentes (Cheng & Hung, 2000).

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 cuja parede inferior apresenta movimento vertical alternativo. Aberturas na parede superior, as quais são abertas em função da velocidade da superfície inferior, são também consideradas. As propriedades termofísicas são consideradas constantes e a influência das forças de corpo são desprezadas. As equações de conservação são escritas utilizando a formulação vorticidade-função corrente. Transformações analíticas de coordenadas são utilizadas de forma a obter um domínio computacional estacionário, no qual serão realizados os cálculos necessários e possibilitar o controle da distribuição de pontos.

## 2. ANÁLISE

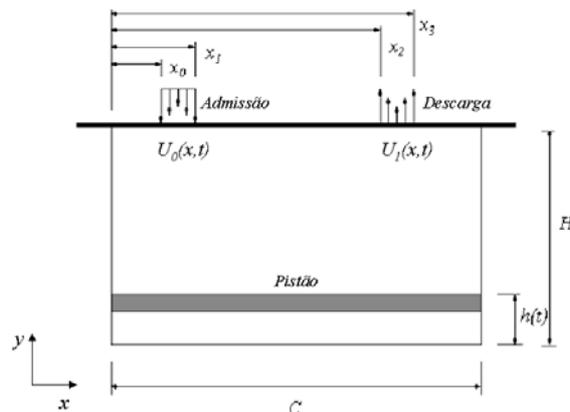


Figura 1 – Esboço do domínio físico, principais dimensões e sistema de coordenadas.

O esboço da geometria sendo estudada é mostrado na Fig.1, juntamente com o sistema de coordenadas utilizado e as principais dimensões da cavidade. O movimento vertical da superfície inferior é descrito por uma função arbitrária  $h(t)$ . As aberturas presentes na superfície superior permitem o fluxo de massa entre a cavidade e sua vizinhança. A velocidade ao longo dessas aberturas é função da velocidade da superfície inferior,  $\dot{h}(t)$ .

No presente trabalho, o escoamento no interior da cavidade é considerado incompressível e efeitos associados a forças de corpo e variação de propriedades termofísicas são desprezados. A partir destas hipóteses as equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia, em forma adimensional, podem ser escritas em coordenadas cartesianas como

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

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

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

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

Com condições de contorno para o movimento ascendente do pistão

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad -r_a \frac{\partial \theta}{\partial x} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x = 0, \quad h(t) < y < 1, \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (5)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad 0 < x < x_2, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (6)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = U_l(x,t), \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0; \quad x_2 < x < x_3, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (7)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x_3 < x < 1/r_a, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (8)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad r_a \frac{\partial \theta}{\partial x} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x = 1/r_a, \quad h(t) < y < 1, \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (9)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = \dot{h}(t), \quad -\frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad 0 < x < 1/r_a, \quad y = h(t), \quad \dot{h}(t) > 0 \quad (10)$$

e para o movimento descendente do pistão

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad -r_a \frac{\partial \theta}{\partial x} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x = 0, \quad h(t) < y < 1, \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (11)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad 0 < x < x_2, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (12)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = U_0(x,t), \quad \theta = 0; \quad x_2 < x < x_3, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (13)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x_3 < x < 1/r_a, \quad y = 1, \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (14)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad r_a \frac{\partial \theta}{\partial x} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad x = 1/r_a, \quad h(t) < y < 1, \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (15)$$

$$u_x = 0, \quad u_y = \dot{h}(t), \quad -\frac{\partial \theta}{\partial y} + Bi\theta = Bi\theta_\infty; \quad 0 < x < 1/r_a, \quad y = h(t), \quad \dot{h}(t) < 0 \quad (16)$$

com  $U_0(x,t)$  e  $U_I(x,t)$  definidas a partir da hipótese de escoamento incompressível e da geometria da cavidade.

Condições iniciais de fluido estagnado e isotérmico expressas por

$$u_x = 0, \quad u_y = 0, \quad \theta = 0; \quad 0 \leq x \leq l/r_a, \quad h(t) \leq y \leq l \quad (17)$$

são também aplicadas.

As variáveis adimensionais são definidas considerando  $C$  como comprimento característico,  $H$  como altura característica, e a velocidade máxima da superfície inferior,  $\dot{h}_{max}$ , como velocidade característica. A temperatura é adimensionalizada em termos da temperatura de entrada,  $T_e$ , e da temperatura característica do fundo,  $T_f$ , que depende da condição empregada para este contorno. Dessa forma, os parâmetros adimensionais são definidos como,

$$r_a = \frac{H}{C}, \quad x = \frac{x^*}{C}, \quad y = \frac{y^*}{H}, \quad t = \frac{t^* \dot{h}_{max}}{H}, \quad u_x = \frac{u_x^*}{\dot{h}_{max}},$$

$$u_y = \frac{u_y^*}{\dot{h}_{max}}, \quad \theta = \frac{T^* - T_e}{T_f - T_e}, \quad Re = \frac{H \dot{h}_{max}}{\nu}, \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}, \quad Bi = \frac{h H}{k} \quad (18)$$

onde  $r_a$ ,  $Re$ ,  $Pr$  e  $Bi$  representam a razão de aspecto da cavidade, o número de Reynolds, o número de Prandtl e o número de Biot, respectivamente.

Com o intuito de desacoplar os campos de pressão do cálculo da velocidade, e reduzir o número de equações a serem resolvidas simultaneamente, as equações de conservação descritas nas Eqs.1-3, são reescritas utilizando a Formulação Vorticidade - Função Corrente, como

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + u_x r_a \frac{\partial \omega}{\partial x} + u_y \frac{\partial \omega}{\partial y} = \frac{l}{Re} \left( r_a^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \quad (19)$$

$$r_a^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} = -\omega \quad (20)$$

A vorticidade ( $\omega$ ) e a função corrente ( $\psi$ ) são definidas em termos das componentes de velocidade em coordenadas cartesianas, respectivamente, como

$$r_a \frac{\partial u_y}{\partial x} - \frac{\partial u_x}{\partial y} = \omega \quad (21)$$

$$u_x = \frac{\partial \psi}{\partial y}, \quad u_y = -\frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (22)$$

A vorticidade e função corrente adimensionais são definidas, respectivamente, como

$$\omega = \frac{\omega^* \dot{h}_{max}}{H}, \quad \psi = \frac{\psi^*}{H \dot{h}_{max}} \quad (23)$$

As condições de contorno para a função corrente são obtidas a partir da integração das definições contidas na Eq.22, como

$$\psi = 0; \quad x = 0, \quad h(t) < y < l \quad (24)$$

$$\psi = g(x,t); \quad 0 < x < l/r_a, \quad y = l \quad (25)$$

$$\psi = \psi_3(x,y,t); \quad x = l/r_a, \quad h(t) < y < l \quad (26)$$

$$\psi = \psi_4(x,y,t); \quad 0 < x < l/r_a, \quad y = h(t) \quad (27)$$

onde

$$g(x,t) = \begin{cases} 0, & 0 < x < x_i \\ \psi_0(x,l,t), & x_i < x < x_f \\ \psi_1(x,l,t), & x_f < x < l/r_a \end{cases} \quad (28)$$

Este processo requer a escolha arbitrária do valor de função corrente em um ponto da cavidade e dos perfis de velocidade nas aberturas.

Deve ser ressaltado que os valores de vorticidade nas superfícies da cavidade são desconhecidos. Estes valores são determinados através de um esquema iterativo de solução (Anderson et al., 1984).

As condições iniciais para o campo de velocidade em termos de vorticidade e função corrente são escritas como

$$\psi = 0, \quad \omega = 0, \quad 0 \leq x \leq l/r_a, \quad h(t) \leq y \leq l \quad (29)$$

### 3. ASPECTOS NUMÉRICOS

Inicialmente, uma mudança de coordenadas é introduzida de forma a transformar o domínio físico de dimensões variáveis em um domínio computacional fixo (Hoffman, 1992).

$$t = \tau \quad (30)$$

$$y = [H - h(t)]\eta + h(t) \quad (31)$$

Para a transformação descrita pelas Eqs.30 - 31, as métricas, obtidas analiticamente, são definidas como

$$\tau_t = l \quad (32)$$

$$\tau_\eta = 0 \quad (33)$$

$$\eta_t = \frac{\dot{h}(t)[h(t) - H] + \dot{h}(t)[y - h(t)]}{[H - h(t)]^2} \quad (34)$$

$$\eta_y = \frac{1}{H - h(t)} \quad (35)$$

$$\eta_{yy} = 0 \quad (36)$$

Em seguida, uma nova transformação é introduzida de forma a concentrar pontos próximo a superfície superior, onde os gradientes mais intensos são esperados nos perfis de solução. Essa concentração de pontos é realizada definindo

$$\eta = \frac{\beta \cdot \left( \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right)^\zeta - \beta}{1 + \left( \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right)^\zeta} \quad (37)$$

onde  $\beta$  é definido como parâmetro de concentração (Hoffman, 1992). Para a transformação descrita pela Eq.37, as métricas obtidas analiticamente são

$$\zeta_\eta = \frac{2 \cdot \beta}{(\beta^2 - \eta^2) \cdot \ln \left( \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right)} \quad (38)$$

$$\zeta_{\eta\eta} = \frac{-2 \cdot (\beta + \eta)}{(\beta^2 - \eta^2)^2 \cdot \ln \left( \frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right)} \quad (39)$$

As Eqs.4 e 19-20, rescritas no novo sistema de coordenadas,  $\xi$  e  $\eta$ , são discretizadas utilizando o Método de Diferenças Finitas a partir do esquema BTCS, e os valores da temperatura nos contornos são obtidos através da resolução do sistemas de equações algébricas, nos casos onde as respectivas condições de contorno forem de segundo ou de terceiro tipos.

O sistema de equações algébricas resultantes do processo de discretização é resolvido pelo método iterativo de Gauss-Seidel, com sub-relaxação e controle local de erro.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados das simulações realizadas com o objetivo de avaliar a influência dos efeitos de convecção forçada, além da influência das válvulas de admissão e descarga situadas na parede superior e do movimento alternado do pistão. Considerou-se, no presente trabalho,  $r_a = 1$  (cavidade quadrada),  $Bi = 10^5$  (temperatura prescrita),  $Pr = 1$  e diferentes valores para  $Re$ , de maneira a analisar sua influência nos perfis de temperatura. Utilizou-se a expressão definida na Eq.40 para o movimento alternado do pistão, onde  $h_0 = 1$ .

$$h(t) = h_0 [1 + \text{sen}(\alpha t)] \quad (40)$$

As simulações foram executadas utilizando uma malha de 41 pontos em cada direção, com tolerância de  $10^{-3}$  no processo iterativo e de  $10^{-6}$  passo no tempo. Os parâmetros de sub-relaxação adotados foram 0,8 para iterações de temperatura nos pontos internos e 0,6 para temperatura nos contornos. O tempo computacional para as simulações para o campo de velocidade e de temperatura foi de 24 horas em um processador DUAL ATHLON XP 1800 MHz. No presente trabalho, casos para os quais o fluido admitido inicialmente no interior da cavidade sofre um processo de aquecimento pelas paredes da cavidade, são estudados. Na válvula de descarga, condições de saída são aplicadas a partir da consideração de fluxo difusivo nulo.

Os resultados são apresentados para diferentes posições do pistão. Cada ciclo corresponde ao deslocamento do pistão partindo da altura inicial  $h_0$ , e chegando nesta mesma altura, com velocidade igual em módulo e sentido à inicial. Os casos analisados, os resultados obtidos estão ilustrados nas Figs.2 e 3, e são representados através dos ciclos 1, 2 e 3. O processo de abertura e fechamento das válvulas ocorre simultaneamente ao movimento do pistão. Quando o pistão se desloca na direção do ponto morto superior, a válvula de descarga se abre, enquanto a de admissão está fechada. Quando o movimento é na direção do ponto morto inferior, a válvula de descarga se fecha e a de admissão se abre, permitindo a entrada de fluido.

A Fig.2 apresenta os resultados para cavidade quadrada ( $r_a = 1$ ) para  $Re = 10$  e  $Pr = 1$ , onde pode-se observar que inicialmente (Fig.2 a) o fluido contido no interior da cavidade é aquecido pelas paredes. Com o deslocamento do pistão na direção do ponto morto superior, o processo de aquecimento se dá a partir da troca de calor com as paredes sólidas, simultaneamente a eliminação de fluido através da válvula de descarga. Este processo envolve inicialmente a descarga do fluido mais aquecido que se encontra nas suas proximidades (Fig.2 b), e o fluido um pouco menos aquecido (Fig.2 c). Com o movimento do pistão descendente, a válvula de admissão é aberta permitindo assim a entrada de fluido menos aquecido, (Fig.2 d, j, p), o qual interage com o processo de aquecimento no interior da cavidade. Esta entrada de fluido também dificulta o desenvolvimento da camada limite hidrodinâmica ao longo da parede esquerda. Não é observada, entretanto, a influência na transferência de calor nas regiões próximas ao pistão. O fluido admitido, interage com fluido parcialmente aquecido na região central, (Fig.2 e, k, q), que ainda sofre aquecimento pelas superfícies sólidas, e é aquecido por difusão pelas paredes aquecidas, (Fig.2 f, l, r). A partir do movimento, o processo de aquecimento é quase completo, como indica uniformidade do campo de temperatura, sendo interrompido apenas pela entrada de fluido menos aquecido através abertura de admissão.

O efeito do aumento do número de Reynolds para  $Re = 100$  é ilustrado na Fig.3. Como conseqüência do aumento das velocidades do escoamento, proporcionou a influência mais significativa dos efeitos convectivos, com a presença das regiões de recirculação, que acarretou em mais tempo, para que o desenvolvimento do processo de transferência de calor atingisse o regime periódico.

Analisando-se o caso para a cavidade quadrada ( $r_a = 1$ ) e  $Pr = 1$ , pode-se observar que inicialmente, para o movimento do pistão ascendente, (Fig.3 a-c), o processo de aquecimento é predominantemente difusivo. Quando o movimento do pistão se torna descendente e o fluido menos aquecido é admitido pela válvula de admissão, forma-se regiões de recirculação ao longo da parede esquerda, dificultando o desenvolvimento da camada limite térmica ao longo desse contorno, (Fig.3 d-f). Essas recirculações se estendem por toda a cavidade, quando o movimento do pistão volta a ser ascendente, influenciando também a camada limite nas demais paredes da cavidade, (Fig.3 g-i), se tornando menos influente com o passar do tempo, (Fig.3 m-o).

O fluido eliminado através da válvula de descarga em cada ciclo, possui inicialmente temperatura maior devido à elevada temperatura próximo da parede superior. Entretanto, ao contrário do observado para  $Re = 10$ , devido as recirculações, o aquecimento do fluido originalmente na região central a ser eliminado, tornou-se mais lento.

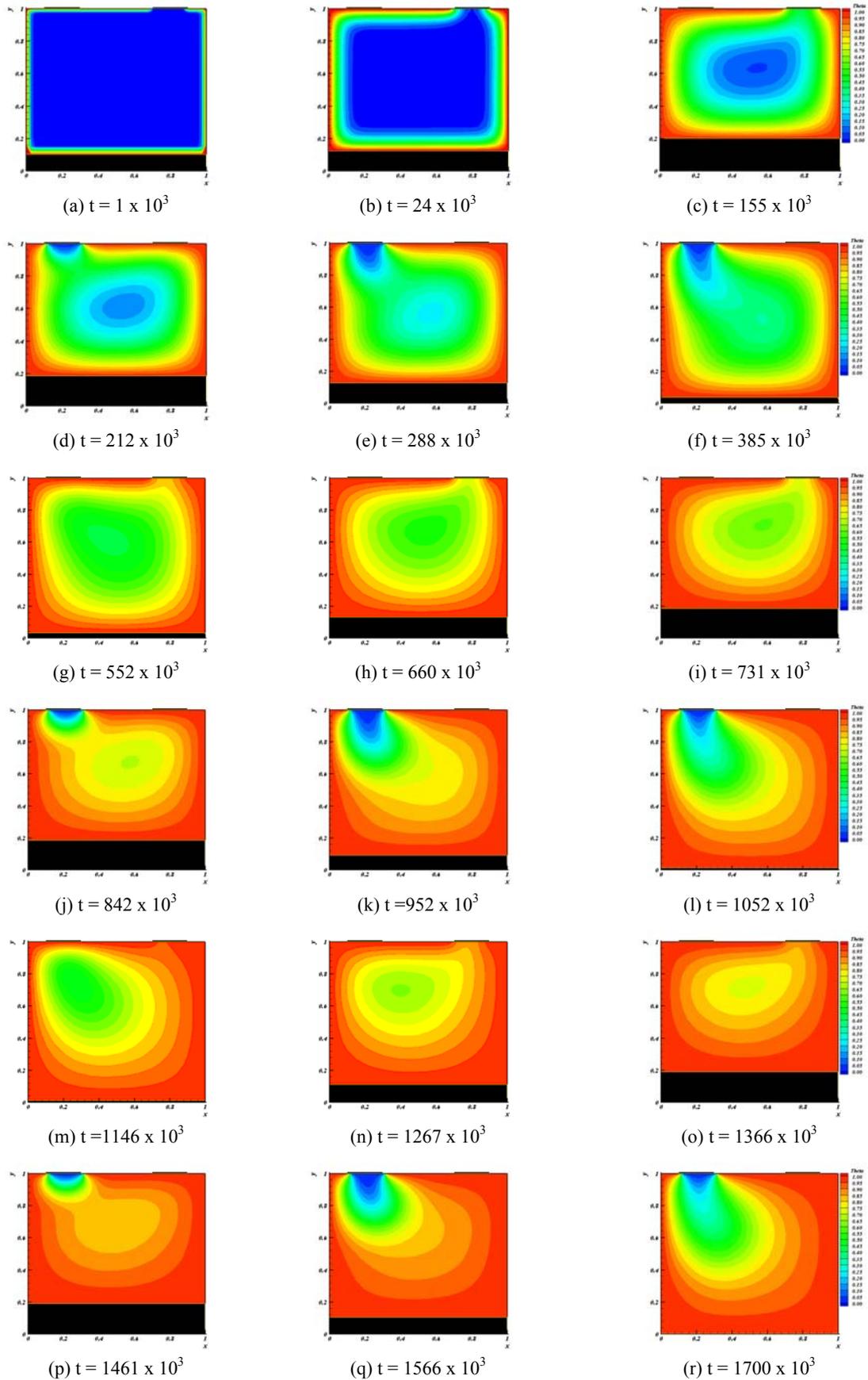


Figura 2 - Campo de Temperatura para Convecção Forçada com  $Re = 10$ ,  $Pr = 1$  e  $r_a = 1$ , Ciclo 1 em (a)-(f), Ciclo 2 em (g)-(l) e Ciclo 3 em (m)-(r)

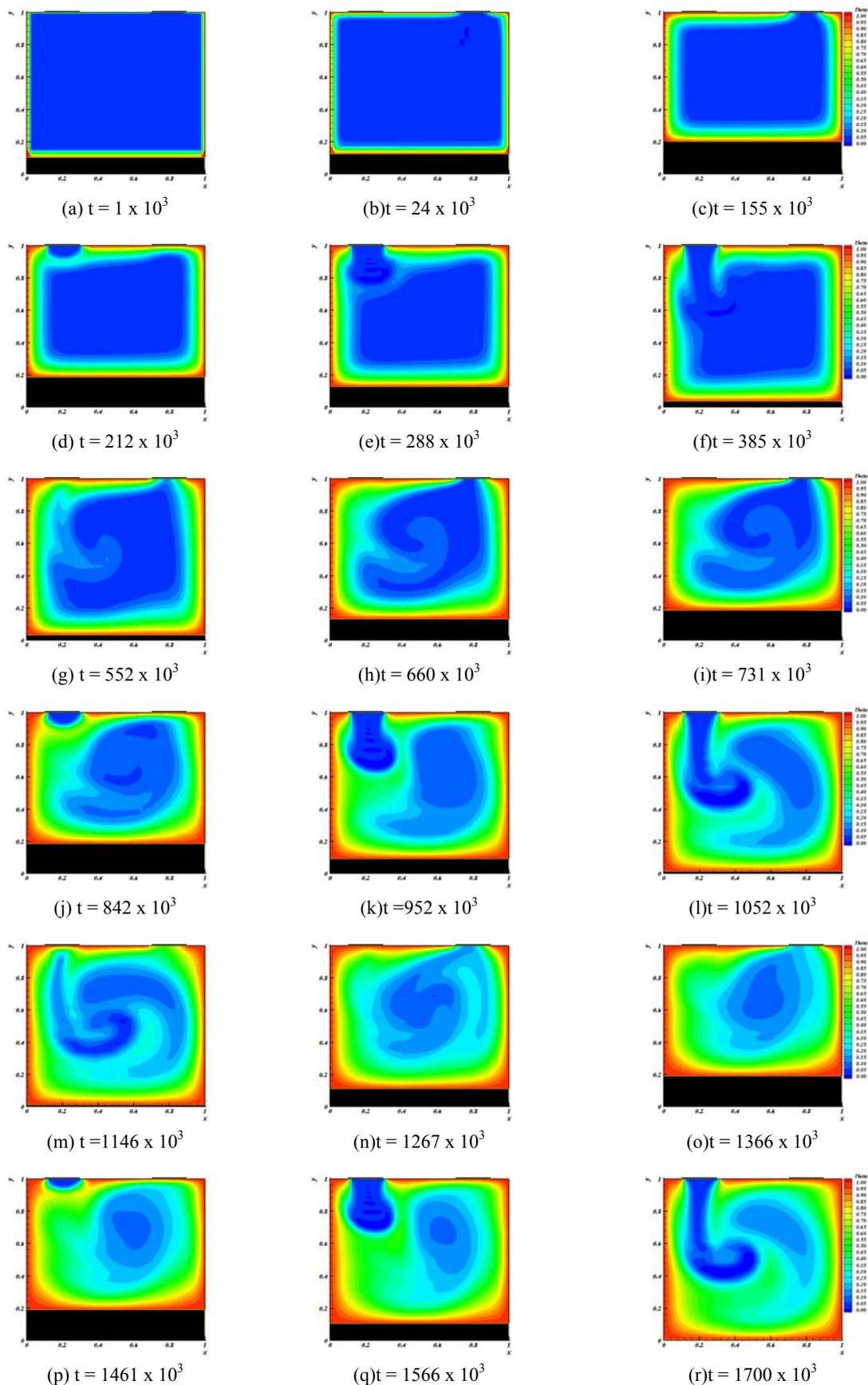


Figura 3 - Campo de Temperatura para Convecção Forçada com  $Re = 100$ ,  $Pr = 1$  e  $r_a = 1$ , Ciclo 1 em (a)-(f), Ciclo 2 em (g)-(l) e Ciclo 3 em (m)-(r)

## 5. CONCLUSÃO

O desenvolvimento dos campos de velocidade e de temperatura foi apresentado e discutido no presente trabalho, com o intuito de avaliá-lo em uma cavidade quadrada, sob a influência do movimento alternado do pistão, das válvulas de admissão e de descarga posicionadas na parede superior, além dos parâmetros adimensionais,  $Re$ ,  $Pr$  e  $Bi$ .

Observou-se que o aumento do número de Reynolds,  $Re = 100$ , proporcionou o aparecimento de regiões de recirculação, como conseqüência do aumento das velocidades do escoamento e da influência mais significativa dos efeitos convectivos. Este comportamento tornou mais lento o aquecimento do fluido originalmente na região central a ser eliminado, ao contrário do observado para o caso de  $Re = 10$ .

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelo financiamento para a realização do trabalho e ao Laboratório de Máquinas Térmicas da COPPE/UFRJ pela disponibilização de recursos computacionais.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, D.A. et al., 1984, "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer", New York: Hemisphere Publishing Corporation.
- Besbes, S. et al., 2001, "Numerical Study of a Heated Cavity Insulated by a Horizontal Laminar Jet", Energy Conversion and Management, v. 42, p. 1417-1435.
- Cheng, C, Hung, K., 2000, "Numerical Prediction of Flow and Thermal Fields in a Reciprocating Piston-Cylinder Assembly", Numerical Heat Transfer Part A – Applications, 38:397-421.
- Clarkson, J. et al., 2001, "Temperature Fields During the Development of Combustion in a Rapid Compression Machine", Combustion and Flame, v. 125, p. 1162-1175.
- Kamotami, Y. et al., 1984, "Experimental Study of Natural Convection in Shallow Enclosures with Horizontal Temperature and Concentration Gradients", Int. J. Heat Mass Transfer, v. 28, n. 1, p. 165-173.
- Mahmud, S., Fraser, R.A., 2003, "The Second Law Analysis in Fundamental Convective Heat Transfer Problems", Int. Journal of Thermal Sciences, v.42, p. 177-186.
- Nikanjam, M., Greif, R., 1978, "Heat Transfer During Piston Compression", Journal of Heat Transfer, v. 100, p. 527-530.
- Shankar, P.N., Deshpande, M.D., 2000, "Fluid Mechanics in the Driven Cavity", Annual Review in Fluid Mechanics, v. 32, p. 93-136.

### **Flow and Temperature Fields Inside Cavities with Oscillating Moving Wall**

Monique Soriano Vital, José Carlos César Amorim  
Instituto Militar de Engenharia  
Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais  
22290-270 – Rio de Janeiro – RJ  
*monique@lmt.coppe.ufrj.br*, *jcamorim@ime.eb.br*

Albino José Kalab Leiroz  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Universidade Federal do Rio de Janeiro  
21945-970 – Rio de Janeiro – RJ  
*leiroz@ufrj.br*

#### **Abstract:**

The evolution of the flow and temperature fields inside two-dimensional cavities with an inward oscillating wall is discussed in the present work. The existence of openings on the cavity stationary walls is also considered. The flow governing equations are solved in a Vorticity-Stream Function formulation. Appropriate Stream-Function boundary conditions are used to describe the oscillating wall movement and the openings along the cavities non-moving walls. Vorticity values along the cavity solid boundaries and openings are determined from an iterative solution procedure. An analytical transformation is initially used to transform the time-dependent physical domain into a regular stationary computational domain within which simulations are performed. Analytically obtained metrics are used to transform the governing equations. The transformed governing equations are discretized using an implicit Finite-Difference scheme. The resulting system of algebraic equations is solved using an iterative method with local error control. A parametric study is performed based on the Reynolds and Prandtl number influence on the transient evolution of the flow and temperature distribution inside the cavity. Results show an intensification of the recirculation zones for increasing Reynolds and different heat transfer mechanics for the cavities studied.

Keywords: cavity flow, convection, numerical methods, grid generation.