

SOLUÇÃO DO ESCOAMENTO HIDRODINÂMICO EM AMBIENTES CONFINADOS COM CONVECÇÃO MISTA

Edelberto L. Reinehr – edel@furb-rct.sc

Universidade Regional de Blumenau, Departamento de Engenharia Química
Rua Antônio da Veiga, 140, CEP-89010-971, Caixa Postal 1507, Blumenau, SC, Brasil

Antonio A Ulson de Souza – augusto@enq.ufsc.br

Selene M. A Guelli U. Souza – selene@enq.ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e de Alimentos, LABSIN – Laboratório de Simulação Numérica de Sistemas Químicos
88.040-900, Florianópolis, SC, Brasil

Resumo. *O objetivo deste trabalho é o estudo de problemas de convecção mista em ambientes confinados. Resolve-se o escoamento de fluido em uma cavidade retangular (altura/largura = $H/L = 2$), com a entrada e a saída de massa através de duas aberturas colocadas uma na base e outra no topo de uma das paredes verticais (parede fria). As paredes verticais são submetidas a uma diferença de temperatura e as paredes horizontais isoladas termicamente. Resolve-se as equações da conservação: massa, quantidade de movimento e energia, utilizando-se o método de volumes finitos. Estuda-se o escoamento ascendente e o descendente do fluido na cavidade. Os resultados obtidos com o método de volumes finitos, expressos em termos das linhas de corrente, são analisados em função do número de Grashof (Gr), baseado na altura total da cavidade e na diferença total de temperatura, na faixa compreendida entre $0 < Gr \leq 10^6$ e do número de Reynolds (Re), baseado na altura da cavidade e na velocidade média do fluido na entrada, com valores iguais a 50, 100 e 300. Os resultados obtidos no trabalho são comparados com os obtidos através do método de elementos finitos disponíveis na literatura, apresentando muito boa concordância.*

Palavras-chave: *Convecção mista, Ambientes confinados, Meio ambiente*

1. INTRODUÇÃO

O estudo da influência da transferência de calor é de fundamental importância na solução de problemas ambientais, especialmente na descarga de contaminantes atmosféricos e na movimentação do ar em ambientes confinados, causada pela convecção natural ou mista. Problemas de conforto térmico, dispersão de contaminantes gasosos e particulados tem grande importância na engenharia e na medicina, pois o ser humano é constantemente submetido a riscos ambientais provocados por contaminantes. (Hoepke (1987), Nazaroff (1988)). Em paralelo com a ação dos contaminantes sobre o ser humano, existe a necessidade, em muitos

processos produtivos e ambientes especiais, de manter a qualidade do ar em níveis pré-determinados. A colocação de aberturas em pontos e dimensões apropriados, bem como a utilização e disposição correta de fontes de energia térmica presentes num ambiente, podem definir o sucesso em alcançar o resultado esperado quanto à qualidade do ar no recinto.

Problemas envolvendo tanto a convecção natural quanto a mista são objeto de estudo de diversos pesquisadores. Oosthuizen & Paul (1985), através de um estudo numérico, avaliaram a região de transição entre a convecção natural e a convecção forçada, bem como o comportamento do escoamento e da transferência de calor na condição de transição (convecção mista), levando em conta relações geométricas (altura/largura) da cavidade e os números de Nusselt para a convecção natural e forçada. Usaram a técnica de elementos finitos, baseada na aproximação de Galerkin, para a solução do sistema de equações governantes. Safi & Loc (1994) estudaram numericamente a convecção mista numa cavidade quadrada alimentada com um jato de ar quente. Quando consideraram as paredes horizontais isoladas (adiabáticas) encontraram que a estratificação térmica inicia quando a relação entre os números de Grashof e Reynolds, na forma Gr/Re^2 , alcança o valor igual a um. Já quando as paredes horizontais não estiverem isoladas, a estratificação térmica não apareceu para nenhum valor da relação Gr/Re^2 . Neste estudo utilizaram o método de diferenças finitas para a solução do sistema de equações governantes. Raji & Hasnaoui (1998), também num estudo numérico, estudaram a convecção mista numa cavidade retangular, com uma relação largura/altura igual a dois. A cavidade é alimentada com um jato de ar frio na base de uma parede vertical, a mesma que é mantida aquecida com um fluxo constante de calor. A alimentação do ar foi mantida sempre na base da parede aquecida enquanto a saída do ar foi estudada em duas situações: na base e também no topo da parede vertical oposta. Utilizou uma faixa de números de Reynolds ($5 \leq Re \leq 5000$) e de Rayleigh ($10^3 \leq Ra \leq 5.10^6$). A configuração com a saída de ar na base não foi considerada adequada para remoção de calor de ambientes, pois provocou maiores temperaturas médias na cavidade. A variação da temperatura média e da temperatura máxima na cavidade decresce com Re para os vários Ra utilizados, nas duas configurações de saída do ar, com exceção da faixa entre Re_{misto} e $Re_{forçado}$, quando ela tende a aumentar um pouco. A técnica empregada para a solução do conjunto de equações governantes foi a de diferenças finitas. Negrão (1998) apresenta um estudo integrando a técnica da fluidodinâmica computacional, que permite obter os gradientes das propriedades dos fluidos, com a técnica Bsim (simulação de escoamentos de energia e de massa em edificações, que considera propriedades médias num ambiente). A proposta é a de que ambientes considerados críticos sejam analisados pela fluidodinâmica computacional, enquanto o restante dos ambientes sejam avaliados pela técnica Bsim.

Neste trabalho será estudado o escoamento no interior de uma cavidade, com entrada e saída de massa, sob condições de convecção mista. Os resultados obtidos neste trabalho utilizando o Método de Volumes Finitos serão comparados com os obtidos por Oosthuizen & Paul (1985), utilizando a técnica de elementos finitos, baseada na aproximação de Galerkin, não se dispondo de dados experimentais da configuração em estudo.

2. PROBLEMA FÍSICO E EQUAÇÕES GOVERNANTES

A Fig. 1 ilustra o problema em estudo. Considera-se uma cavidade retangular com relação geométrica (H/L) igual a 2 e com (A/H) igual a 0,2, onde A corresponde a dimensão de cada uma das aberturas. A cavidade é submetida a um fluxo de calor, mantendo-se as paredes verticais com uma diferença de temperatura entre elas. Pela abertura na base da parede fria é alimentada uma corrente horizontal e laminar de fluido frio.

As hipóteses assumidas para o sistema a ser estudado consideram que o escoamento interno é estacionário, laminar, fluido Newtoniano e incompressível. Todas as propriedades

do fluido (ρ , μ , k , cp) são consideradas constantes, com exceção da massa específica na direção vertical que obedece a aproximação de Boussinesq. A dissipação viscosa e os efeitos de compressibilidade são considerados desprezíveis na equação da conservação da energia. Também não existe geração de calor no interior da cavidade. Assume-se que a terceira dimensão seja infinita, de tal forma que o escoamento do fluido e a transferência de calor sejam tratados como bidimensionais.

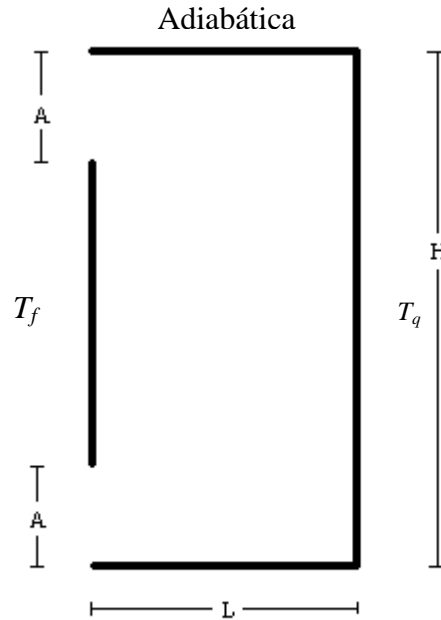


Figura 1 – Cavidade retangular com entrada e saída de massa

Como condições de contorno, assume-se que as paredes horizontais são adiabáticas enquanto que as paredes verticais são mantidas a temperaturas constantes, uma fria (T_f), que contém as aberturas, e outra quente (T_q). O fluido que é alimentado na cavidade entra com velocidade uniforme para a componente horizontal e velocidade nula para a componente vertical. A temperatura do fluido alimentado é igual a da parede fria (T_f). O fluido em contato com as paredes da cavidade tem velocidade nula. Na saída da cavidade as condições de contorno são: para o escoamento, assume-se a condição de pressão constante, e para a temperatura, assume-se a condição de saída (gradiente nulo).

2.1 Equações governantes

Com as hipóteses assumidas acima, obtém-se o seguinte conjunto de equações para a cavidade em estudo:

- Conservação da massa:

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

- Conservação da quantidade de movimento na direção x :

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

- Conservação da quantidade de movimento na direção y :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho uv) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho vv) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x}\left[\mu \frac{\partial v}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\mu \frac{\partial v}{\partial y}\right] - g\rho_{ref} \cdot [1 - \beta(T - T_{ref.})] \quad (3)$$

- Equação da conservação da energia:

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

O número de Grashof utilizado na análise dos resultados é definido com base na altura da cavidade (H) e na diferença de temperatura entre as paredes quente e fria ($T_q - T_f$); o número de Reynolds utiliza a velocidade do fluido na entrada da cavidade (u_e) e a altura da cavidade (H), de tal forma que:

$$Re = \frac{u_e \cdot H}{\nu} \quad Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot (T_q - T_f) H^3}{\nu^2} \quad (5)$$

onde β representa o coeficiente de expansão volumétrica do fluido e $\nu = \mu/\rho$ é a viscosidade cinemática.

Para a solução do sistema de Eqs. de (1) a (4), utiliza-se o método de volumes finitos, com o arranjo co-localizado de variáveis. Emprega-se o esquema WUDS para as funções de interpolação e o algoritmo SIMPLEC para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade. A malha empregada é a malha cartesiana uniforme 40x40.

3. RESULTADOS

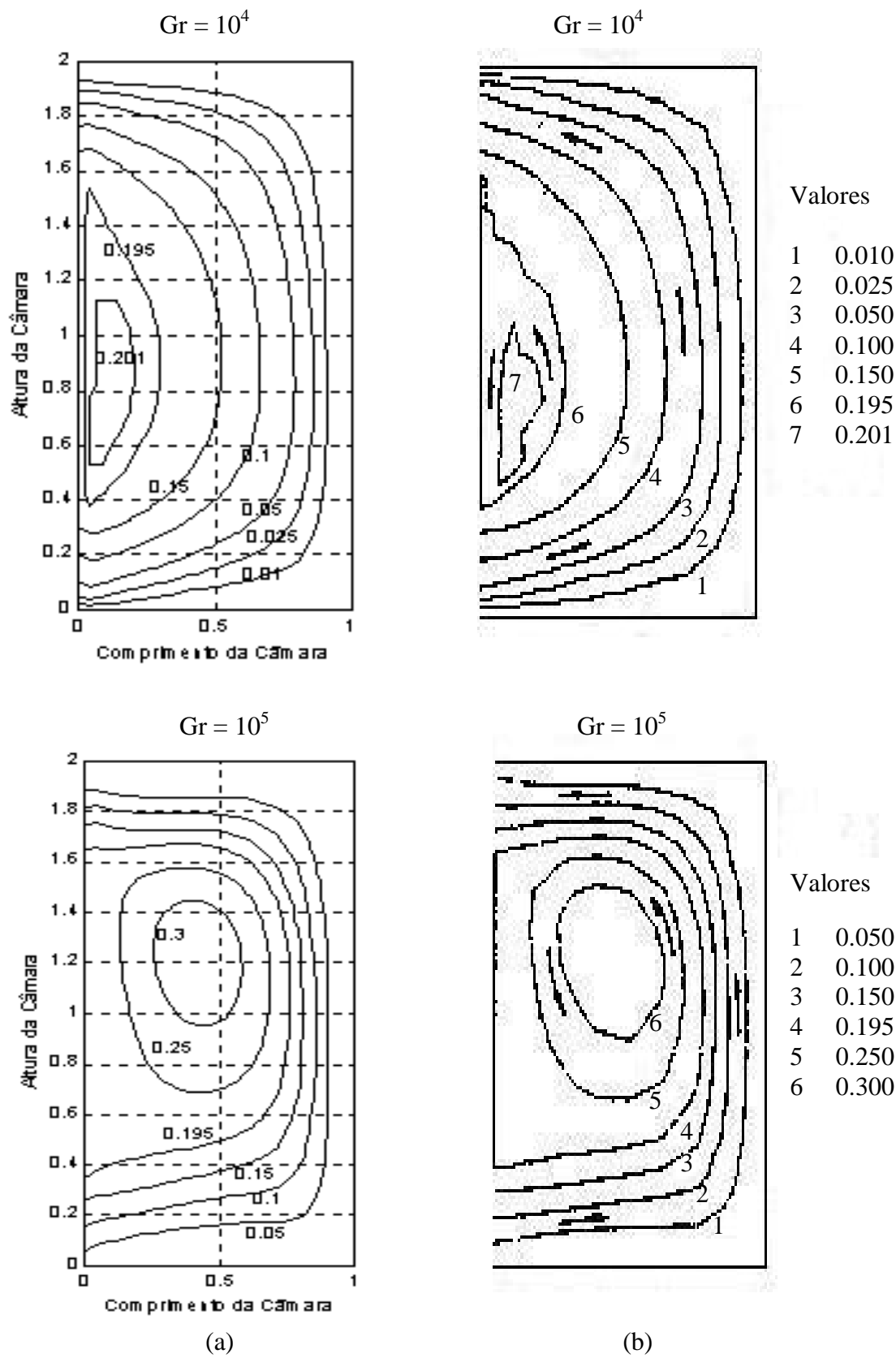
Devido ao interesse na aplicação do estudo em ambientes confinados e ocupados pelo ser humano, todos os resultados apresentados estão relacionados a um fluido com número de Prandtl igual a 0,71, de forma a simular a utilização do ar atmosférico.

3.1 Escoamento hidrodinâmico

Os resultados ilustrados nas figuras estão expressos em termos das linhas de corrente, para facilitar a comparação com os resultados apresentados por Oosthuizen & Paul (1985). O cálculo da função corrente (Ψ) foi efetuado a partir das componentes de velocidade u e v obtidas pela solução das Eqs. (1) a (4), e adimensionalizadas de acordo com a Eq. (6), conforme Oosthuizen & Paul (1985).

$$\Psi_{a \text{ dim}} = \frac{\Psi}{u_e \cdot H} \quad (6)$$

Os resultados do escoamento hidrodinâmico na condição ascendente mostram a ocorrência de recirculações. O comportamento destas recirculações modifica-se com a velocidade de alimentação do fluido na cavidade. As Figs. 2 e 3 ilustram as linhas de corrente obtidas neste trabalho (a) e por Oosthuizen & Paul (1985) (b), para $Gr = 10^4$ e 10^5 , e $Re = 50$



Valores

1	0.010
2	0.025
3	0.050
4	0.100
5	0.150
6	0.195
7	0.201

Valores

1	0.050
2	0.100
3	0.150
4	0.195
5	0.250
6	0.300

Figura 2 – Linhas de corrente para o escoamento ascendente para a cavidade com $Re = 50$ e $H/L = 2$
a) neste trabalho - b) Oosthuizen & Paul (1985)

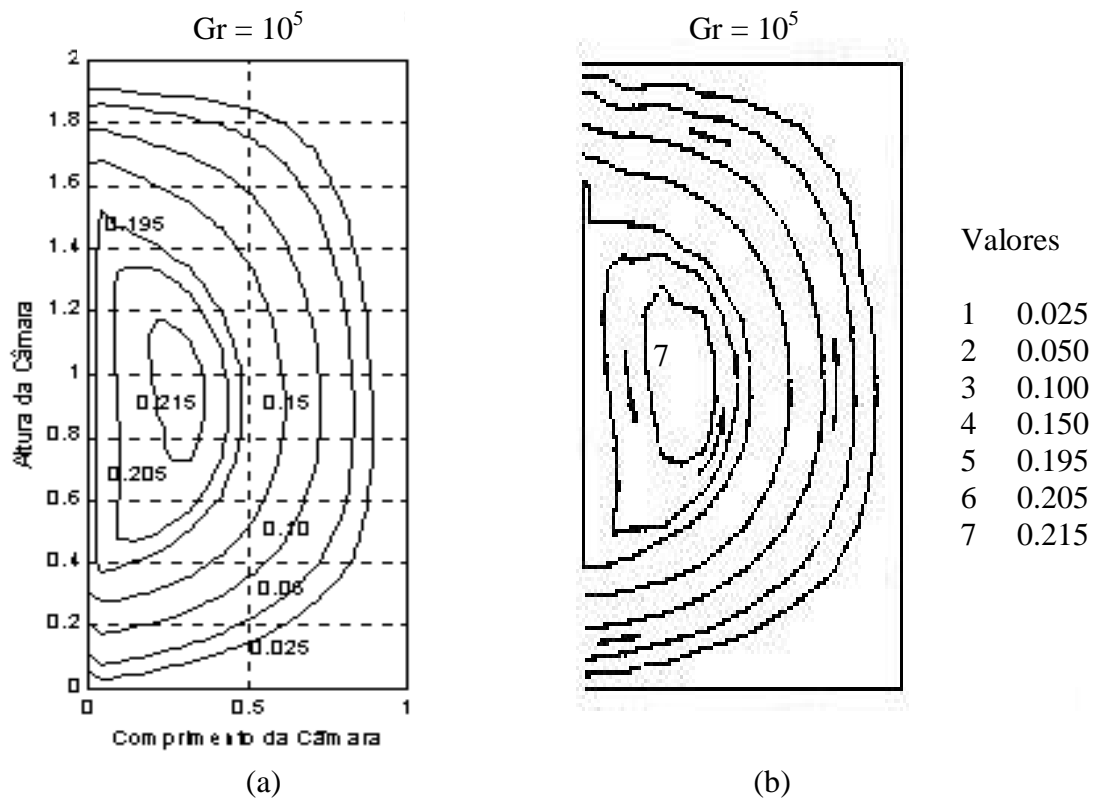
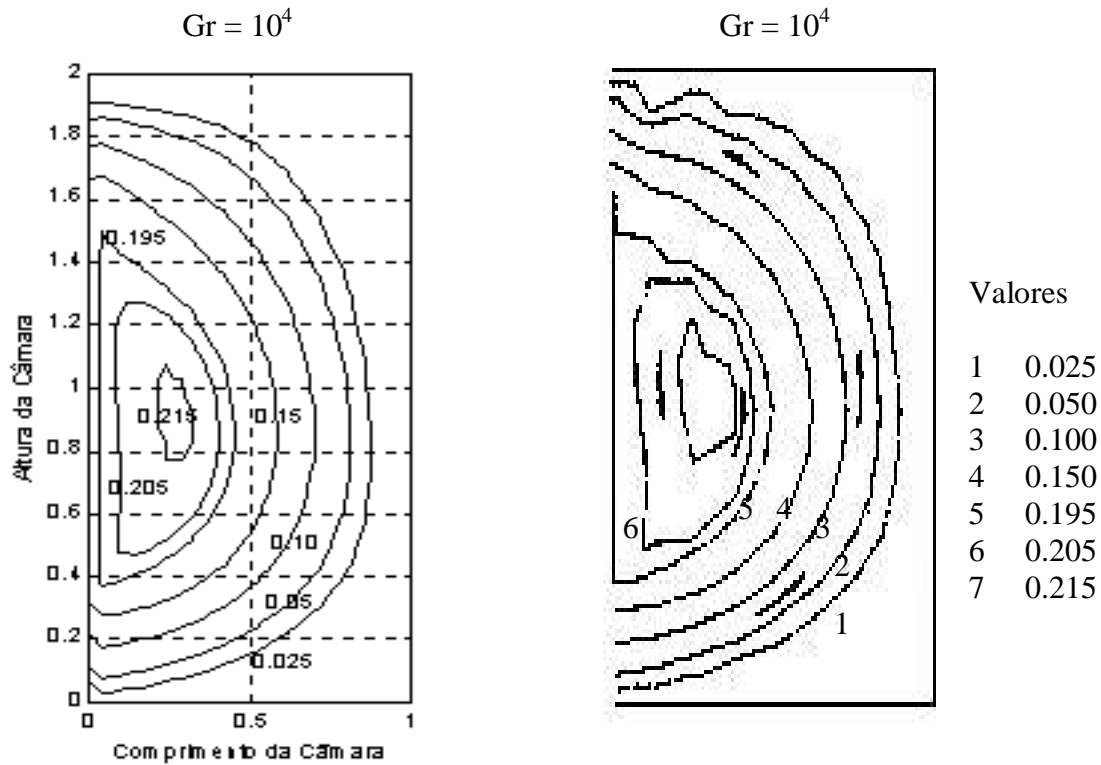


Figura 3 – Linhas de corrente para o escoamento ascendente, para a cavidade com $Re = 300$ e $H/L = 2$
a) neste trabalho - b) Oosthuizen & Paul (1985)

e 300, respectivamente. Na Fig. 2 pode-se observar que para números de Re baixos, com Gr mais baixos ($Gr = 10^4$), a recirculação se forma próxima da região de entrada do fluido e junto à parede vertical. Com o aumento do Gr ($Gr = 10^5$), esta recirculação tende a se deslocar para o interior da cavidade. A medida que Re aumenta (Fig. 3), esta tendência de variação na posição da recirculação com o Gr vai diminuindo significativamente, tendendo para uma determinada região que se situa no plano intermediário da parede que contém as aberturas.

As linhas de corrente do escoamento hidrodinâmico na condição descendente, para facilitar a comparação dos resultados e análise do comportamento no interior da cavidade, são simulados mantendo a mesma condição de entrada e saída ascendente, porém fixando os Gr com valores negativos. A Fig. 4 ilustra as linhas de corrente para o escoamento descendente. Os resultados hidrodinâmicos neste regime apresentam um comportamento distinto daqueles do escoamento ascendente. Para $Re = 50$ não se observaram recirculações junto à parede com as aberturas, na faixa de Gr estudada. Com o aumento de Re , as recirculações começam a aparecer junto a esta parede e a Fig. 4 (b) as ilustra. No escoamento descendente, junto à parede oposta a das aberturas, o escoamento hidrodinâmico muda substancialmente com o aumento do efeito da flutuação (Gr), iniciando com recirculações junto aos cantos desta parede em Gr mais baixos e chegando a alcançar um ponto em que junto a esta parede se forma uma corrente fechada de recirculação ao longo de toda a altura da cavidade. Desta forma a corrente de fluido que é alimentada na cavidade é gradativamente comprimida para junto da parede que contém as aberturas. Porém, o aumento do número de Re atenua o surgimento deste efeito. Por exemplo, para $Re = 300$, a recirculação fechada ao longo de toda a altura da cavidade só ocorreu com Gr entre -10^5 e -10^6 , ilustrado pelas Figs. 4 (b) e 4 (c).

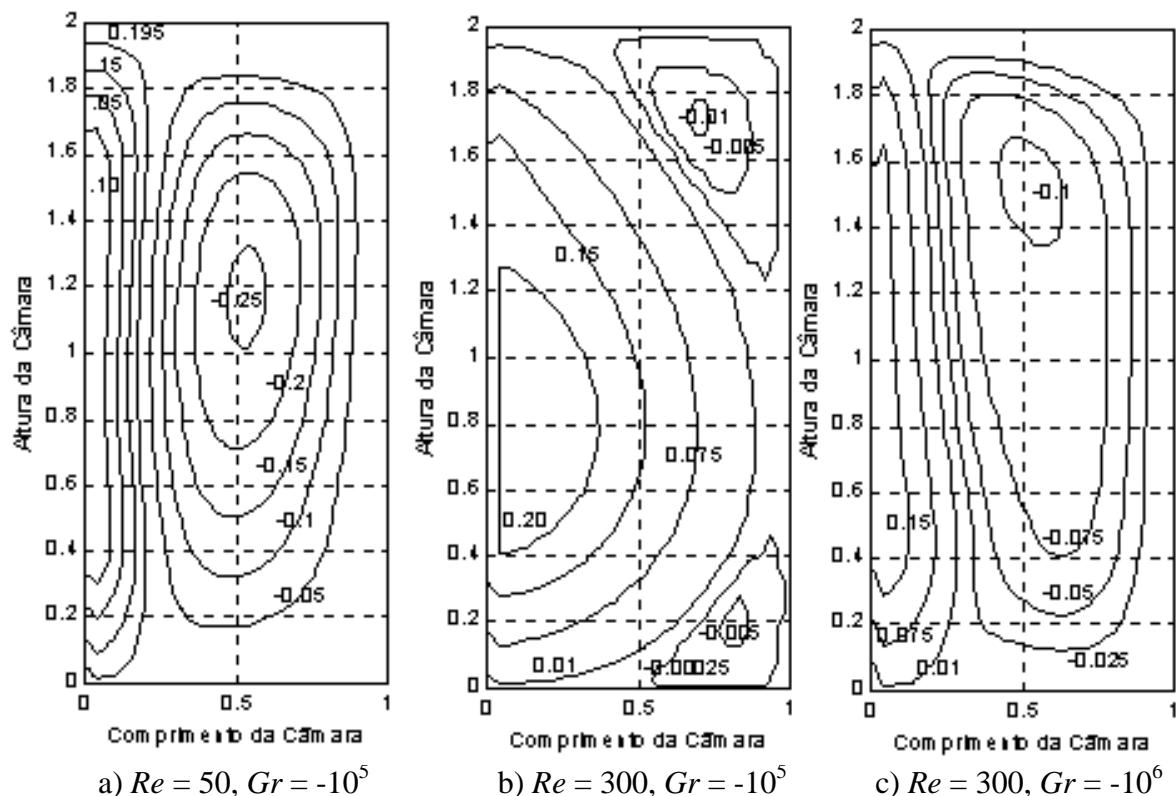


Figura 4 – Linhas de corrente para o escoamento descendente em cavidade com $H/L = 2$

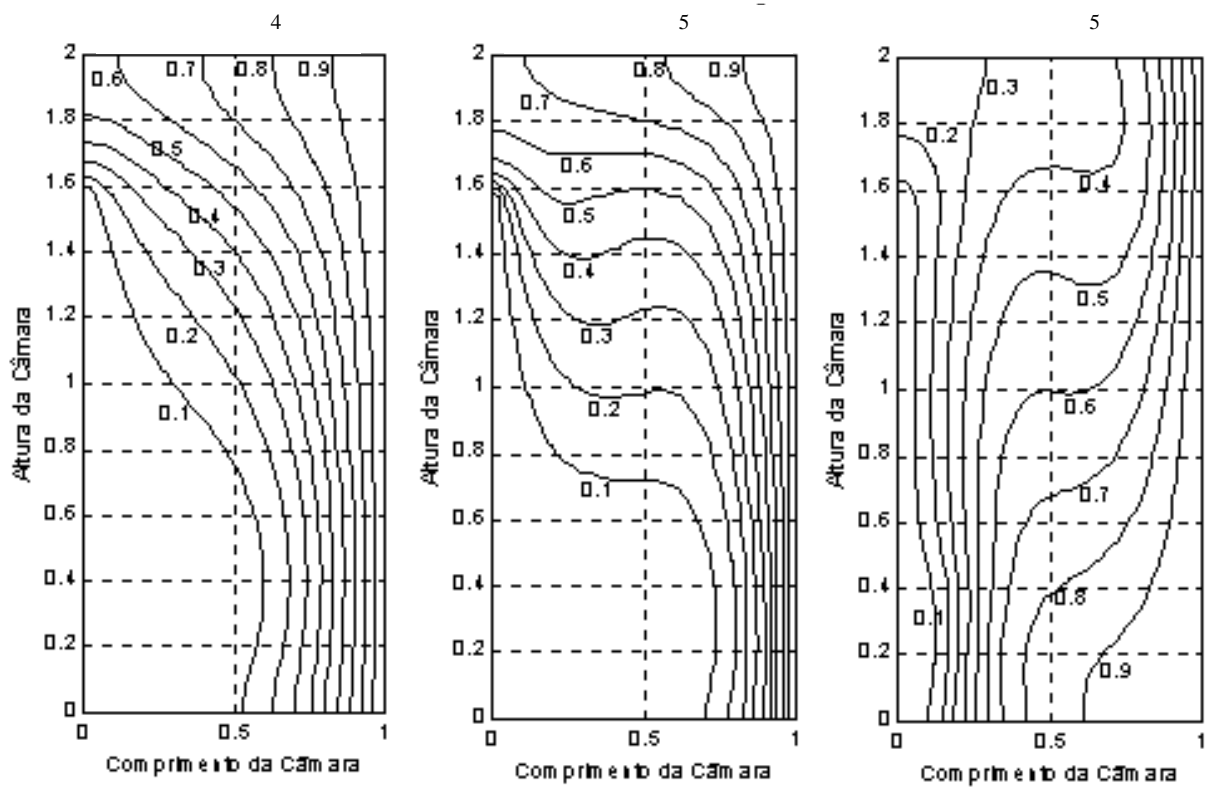


Figura 5 – Isothermas para a cavidade com $Re = 50$ e $H/L = 2$

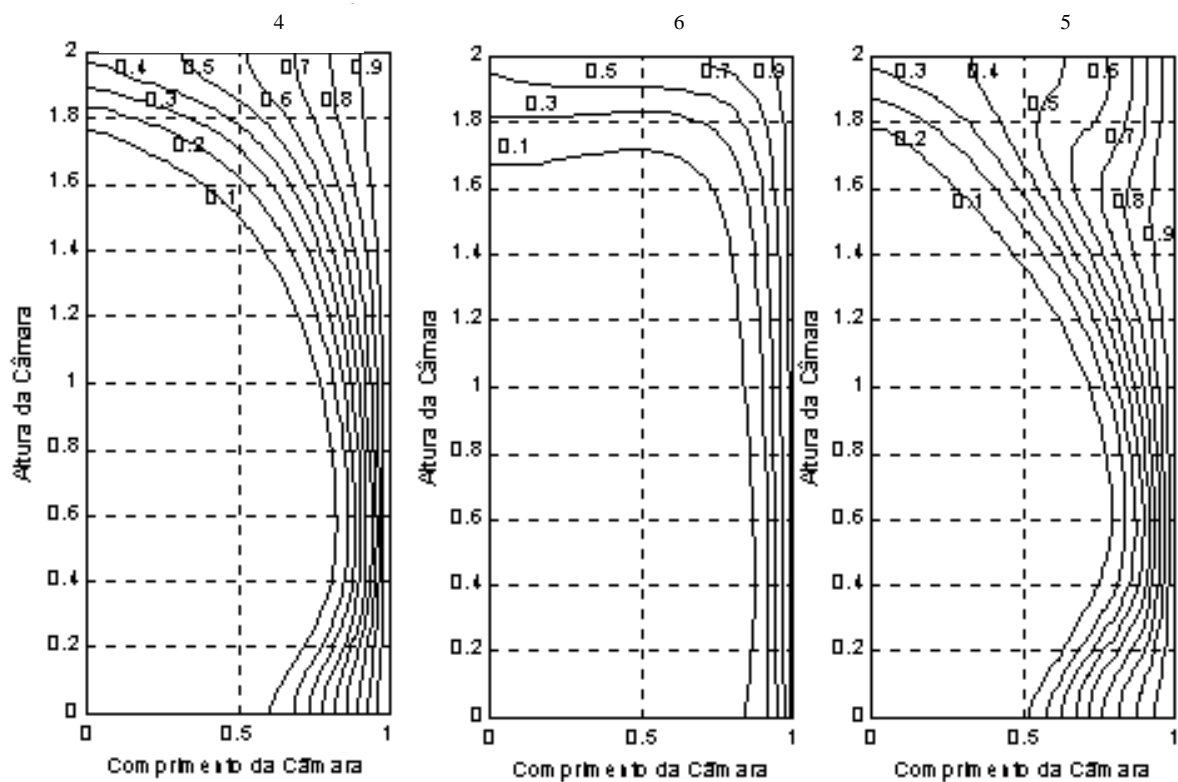


Figura 6 – Isothermas para a cavidade com $Re = 300$ e $H/L = 2$

Para $Re = 50$ a recirculação iniciou com $Gr = -10^4$ e se apresenta bem formada com $Gr = -10^5$, esta última ilustrada na Fig. 4 (a). O surgimento destas recirculações terá efeito sobre a distribuição e remoção de contaminantes e na temperatura no interior da cavidade, o que justifica o presente estudo.

Os resultados do escoamento hidrodinâmico, quando comparados com os resultados apresentados por Oosthuizen & Paul (1985) para todos os casos estudados, apresentam uma concordância muito boa. A localização do centro da recirculação principal obtida neste trabalho foi comparada com os resultados obtidos por Oosthuizen & Paul (1985). Com relação à distância da parede horizontal inferior, para $Re = 50$, $Gr = 10^4$ e 10^5 , foi obtido um desvio de 1.12% e 1.83%, respectivamente. Com relação à distância da parede fria, para $Re = 50$, $Gr = 10^4$ e 10^5 , foi obtido o desvio de 1.14% para os dois casos. Para $Re = 300$, $Gr = 10^4$ e 10^5 , foi obtido o desvio de 3.57% e 1.22%, respectivamente, com relação à distância da parede horizontal inferior da cavidade. Já com relação à distância da parede fria, para $Re = 300$, $Gr = 10^4$ e 10^5 , foi encontrado neste trabalho um desvio de 0.0% e 2.38%, respectivamente.

3.2 Isotermas

Devido às diferenças entre as temperaturas das paredes quente e fria variarem para cada Gr , numa mesma geometria de cavidade, os resultados para a temperatura serão apresentados em função de uma temperatura adimensional definida de acordo com a Eq. (7):

$$\theta = (T - T_f) / (T_q - T_f) \quad (7)$$

Cada isoterma ilustrada nas Figs. 5 e 6 está representando uma variação de 10% entre a diferença de temperatura da parede fria e a quente.

Para o escoamento ascendente, comparando-se os resultados apresentados nas Figs. 5 e 6, pode-se observar que, para uma mesma diferença de temperatura entre as duas paredes verticais (mesmo Gr), a medida em que Re aumenta, é possível aumentar a fração volumétrica da cavidade que possui a temperatura próxima à temperatura do fluido que entra. Observa-se, de forma similar, para um mesmo Re (Fig. 6), que o aumento do Gr também aumenta a fração volumétrica da cavidade que apresenta a temperatura próxima à temperatura do fluido que é alimentado na cavidade, levando os maiores gradientes de temperatura para próximo da parede quente. Na Fig. 6 são apresentadas as isotermas para $Re = 300$, com $Gr = 10^6$, ao invés de apresentar para $Gr = 10^5$, pois as isotermas para $Gr = 10^5$ eram muito próximas as do caso com $Gr = 10^4$. Analisando-se as Figs. 5 e 6 pode-se concluir que uma combinação adequada entre Re e Gr pode influir significativamente no conforto térmico de um ambiente.

Para o escoamento descendente, observa-se a tendência da temperatura no interior da cavidade ficar mais elevada, para mesmos valores de Re , comparativamente ao escoamento ascendente, como ilustram as Figs. 5 e 6. Nestes casos a distribuição das isotermas ocupa praticamente toda a cavidade. Esta configuração tende a ser menos indicada se o objetivo for a renovação do ar da cavidade, ou o conforto térmico quando o calor deve ser removido.

4. CONCLUSÕES

As justificativas para os comportamentos hidrodinâmicos observados nos casos estudados são explicados pela relação existente entre as forças de flutuação, causadas pela diferença de temperatura entre as paredes, e as forças convectivas induzidas pela alimentação do fluido na entrada da cavidade. O comportamento em escoamento ascendente, para baixos Re , pode ser justificado pela maior influência da força de flutuação frente à convectiva, esta última

induzida pela alimentação do fluido, de tal forma que quanto maior o Gr , mais o escoamento tende a se intensificar junto à parede aquecida, atraindo a recirculação para aquela direção. Já para um mesmo Gr , o aumento no Re faz com que as forças convectivas cresçam frente às de flutuação, de forma que estas últimas tenham em muito diminuída a sua influência no movimento.

Uma combinação adequada entre Re e Gr pode influir significativamente no conforto térmico de um ambiente.

Quando o objetivo for a renovação do ar, ou o conforto térmico na situação em que o calor deve ser removido, a configuração de escoamento descendente passa a ser a menos indicada.

REFERÊNCIAS

- Hoepke, P. K., 1987, Ed. Radon and its decay products: occurrence, properties and health effects. ACS Symposium Series 331, American Chemical Society, Washington, DC.
- Nazaroff, W. W. and Nero, A. V., 1988, Eds. Radon and Its Decay Products in Indoor Air, J. Wiley, New York.
- Negrão, C. O. R., 1998, Integration of computational fluid dynamics with building thermal and mass flow simulation. Energy and Buildings, vol. 27, pp. 155-165.
- Oosthuizen, P. H., & Paul, J. T., 1985, Mixed convective heat transfer in a cavity: fundamentals forced and mixed convection, Proceedings of the 23rd National Heat Transfer Conference, August 4-7, Denver, Colorado, HTD-vol 42, pp. 159-169.
- Raji, A. & Hasnaoui, M., 1998, Mixed Convection Heat Transfer in a Rectangular Cavity Vented and Heated From the Side, Numerical Heat Transfer, Part A, vol. 53, pp. 533-548.
- Safi, M. J., & Loc, T. P., 1994, Development of thermal stratification in a two-dimensional cavity: a numerical study, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 37, n. 14, pp. 2017-2024.

SOLUTION OF THE HIDRODINAMIC FLOW IN CONFINATED PLACES WITH MIXED CONVECTION

Abstract. In this work it is studied the problems of mixed convection in confined places. The fluid flow is solved in a rectangular cavity ($H/L = 2$), with the mass entrance and exit through two openings: in the base and in the top of the cold vertical wall. The vertical walls are submitted to a temperature difference and the horizontal walls are thermally insulated. It is solved the conservation equations: mass, momentum and energy, being used the finite volume method. It is studied the upflow and downflow in the cavity. The results obtained with the finite volume method, expressed in terms of the streamlines, are analyzed in function of the Grashof number based on the cavity height and in the total temperature difference, $0 < Gr < 10^6$, and of Reynolds number, based on the cavity height and in the average velocity of the fluid in the entrance, Re equal to 50, 100 and 300. The results obtained in this work are compared with those obtained through the finite element method, found in the literature, presenting very good agreement.

Keywords: Mixed convection, confined places, environment