

## CONVECÇÃO NATURAL EM CANAIS ABERTOS PARABÓLICOS CONVERGENTES E DIVERGENTES

**Vinícius Souza Melo<sup>1</sup>**

**José Mauricio Gurgel<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Tecnologia Mecânica, 58059-900, João Pessoa, PB, Brasil.

**Celso R.B. Filho<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Centro de ciências e Tecnologia, CEP 58102-970, Campina Grande ,PB, Brasil.

**Francisco Marcondes<sup>3</sup>**

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, 60.455-760, Fortaleza, CE, Brasil. [marconde@dem.ufc.br](mailto:marconde@dem.ufc.br)

**Resumo.** *Convecção natural em canais abertos tem sido extensivamente analisada devido ao largo espectro de aplicações como por exemplo, o resfriamento de equipamentos eletrônicos, coletores solares, dentre outros. No entanto, exceto por um pequeno número de trabalhos, a maioria dos casos analisados concentram-se no estudo da convecção natural em canais formados por duas placas planas e paralelas. Além do mais, quase todas as metodologias numéricas empregadas para este caso desprezam os termos difusivos nas equações de conservação, na direção principal do escoamento. Desta forma, pode-se aplicar um procedimento de marcha ao longo do canal a partir de condições conhecidas na entrada. No entanto, quando estes termos são desprezados nas equações de conservação não é possível a detecção de bolsas de recirculação que podem estar presentes na saída do canal. O presente trabalho tem por objetivo estudar a convecção natural em canais aberto parabólicos com formatos convergente/divergente, retendo os termos difusivos na direção principal do escoamento nas equações de conservação. As equações serão resolvidas pelo método dos volumes finitos com arranjo co-localizado. Os resultados são apresentados em termos de linhas de corrente e isotermas, bem como número de Nusselt médio.*

**Palavras chaves:** *Convecção natural, canais abertos parabólicos convergentes/divergentes, arranjo co-localizado.*

### 1. INTRODUÇÃO

Convecção natural em canais abertos tem sido extensivamente estudada na literatura devido ao largo espectro de aplicação, como por exemplo, dimensionamento de condensadores de refrigeradores, disposição das placas de circuitos em equipamentos eletrônicos, secadores de grãos, chaminés, coletores solares, resfriamento/aquecimento de ambientes, etc. Exceto por alguns trabalhos, a maioria dos casos analisados referem-se a canais planos e paralelos. Em relação às soluções numéricas, para canais planos, grande parte das soluções desprezam na direção principal do escoamento os termos difusivos nas equações de conservação. Neste trabalho denominar-se-á esta metodologia de parabólica. Esta metodologia foi empregada para a solução da convecção natural em canais abertos e paralelos por Bodoia e Osterle (1962), Aung et al. (1972), Aihara (1973), Aung e Worku (1986), Sparrow et al. (1984), dentre outros. Um inconveniente desta

metodologia é o fato da velocidade na entrada do canal não ser conhecida a priori para um determinado conjunto de dados (altura do canal, diferença de temperatura da parede/ambiente, tipo de fluido, etc.) exigindo então um procedimento iterativo, ou seja, inicialmente é prescrita uma determinada vazão e o procedimento de marcha é então inicializado, e até que a pressão na saída do canal seja igual à pressão ambiente um novo valor de vazão é então prescrito e se repete o procedimento. Neste ponto tem-se a vazão succionada pelos efeitos de empuxo. O outro inconveniente é o fato desta metodologia não poder captar e mesmo divergir quando do surgimento de bolsas de recirculação, como por exemplo, na saída dos canais paralelos com condições de aquecimento assimétricas ou canais divergentes com condições de aquecimento simétricas. Neste caso a única alternativa do ponto de vista numérico é manter os termos difusivos na direção principal do escoamento. No presente trabalho este procedimento será denominado por metodologia elíptica.

O principal inconveniente da metodologia elíptica é o fato das condições de contorno para pressão e velocidade na entrada do canal não serem conhecidas. Uma tentativa de contornar esta dificuldade é prescrever condições de contorno do tipo parabólicas longe da entrada do canal e onde supostamente os efeitos de empuxo estão ausentes. Kettleborough (1972), Nakamura et al. (1982) e Naylor et al. (1991) empregaram este artifício para resolver o problema da convecção natural em canais com aquecimento simétrico. Um inconveniente deste tipo de aplicação é a criação de incógnitas adicionais relativas a região externa do canal. Em alguns casos, esta região é muito maior do que a região de interesse. Uma outra alternativa é resolver as equações de interesse somente no canal com a criação de equações adicionais que possam evoluir de forma adequada a pressão e a velocidade na entrada do canal, durante o procedimento iterativo da solução. Nieckle e Azevedo (1987) apresentaram a solução para a convecção natural em canais abertos com aquecimento simétrico com a metodologia elíptica envolvendo apenas o domínio de interesse. Maliska e Marcondes (1993) apresentaram um procedimento para a aplicação das condições de contorno na entrada de canais com formatos diversos durante a solução elíptica das equações de conservação. No entanto, neste trabalho apenas resultados para canais planos com aquecimento simétrico e/ou não-assimétrico foram apresentados. No trabalho de Marcondes e Maliska (1999) foi apresentada a solução elíptica da convecção natural em canais abertos em formato de L, com as equações de conservação sendo resolvidas apenas na região de interesse. Sparrow e Ruiz (1988a-b) apresentaram resultados experimentais e numéricos, usando metodologia parabólica, para a configuração formada por duas placas planas com formato convergente e divergente.

Uma extensão da configuração plana convergente/divergente é aquela de canais parabólicos por se aproximar das chaminés de tiragem natural da indústria. Neste trabalho serão apresentados resultados para canais com aquecimento simétrico e perfis parabólicos. Por questão de validação do código computacional serão apresentados alguns resultados para canais planos, paralelos, convergentes e divergentes utilizando a metodologia elíptica. A Fig. 1 mostra os domínios de interesse, descrevendo algumas características geométricas importantes. Para cada configuração serão analisadas diversos valores do parâmetro  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{sm\acute{a}x}$ , onde  $Ra_{sm\acute{a}x}$  é o número de Rayleigh baseado no espaçamento máximo entre as placas. O número de Prandtl foi mantido igual a 5,0. As equações serão discretizadas via método dos volumes finitos com arranjo de variáveis co-localizado. O acoplamento pressão-velocidade será tratado via algoritmo PRIME, Maliska (1995).

## 2. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Assumindo escoamento bi-dimensional laminar e incompressível, aproximação de Boussinesq e fluido Newtoniano pode-se escrever as equações que descrevem a convecção natural no sistema generalizado de coordenadas  $(\xi, \eta)$  para um escalar  $\phi$  como,

$$\frac{1}{J} \frac{\partial}{\partial t} (\tilde{n} \mathbf{f}) + \frac{\partial}{\partial \hat{t}} (\tilde{n} U \mathbf{f}) + \frac{\partial}{\partial \xi} (\tilde{n} V \mathbf{f}) = \frac{\partial}{\partial \hat{t}} \left( C_1 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \hat{t}} + C_2 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( C_2 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \hat{t}} + C_4 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \xi} \right) - \hat{P}^f + \hat{S}^f \quad (1)$$

onde,

$$\begin{aligned}
 P^u &= \frac{\partial P}{\partial \hat{t}} y_\zeta - \frac{\partial P}{\partial \zeta} y_{\hat{t}} & P^v &= \frac{\partial P}{\partial \zeta} x_{\hat{t}} - \frac{\partial P}{\partial \hat{t}} x_\zeta \\
 S^u &= S^T = 0 & S^v &= \tilde{n} g \hat{a} (T - T_o) \\
 C_1 &= \hat{a} J \tilde{A}^{\hat{o}} ; C_4 = \tilde{a} J \tilde{A}^{\hat{o}} & C_2 &= -\hat{a} J \tilde{A}^{\hat{o}} ; \hat{a} = x_{\hat{t}} x_\zeta + y_{\hat{t}} y_\zeta \\
 \hat{a} &= x_{\hat{t}}^2 + y_{\hat{t}}^2 ; \tilde{a} = x_\zeta^2 + y_\zeta^2 & U &= y_h u - x_h v ; V = x_x v - y_x u \\
 \hat{P}^f &= \frac{P^f}{J} & \hat{S}^f &= \frac{S^f}{J}
 \end{aligned} \tag{2}$$

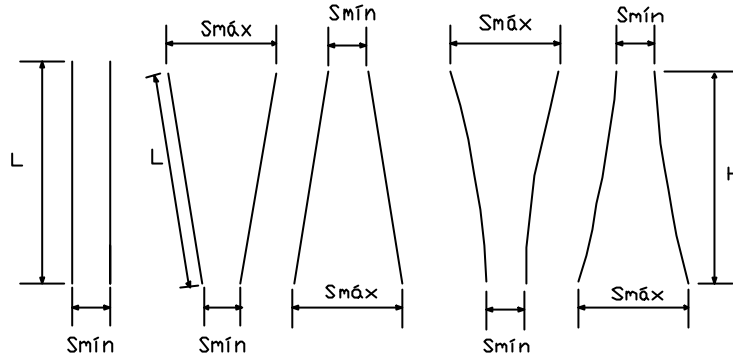


Fig. 1 - Perfis dos canais utilizados para a simulação

Quando  $\phi$  é igual a 1 a equação de conservação da massa é obtida e para  $\phi$  igual a  $u, v$  e  $T$  as equações de conservação do momento e energia são respectivamente, recuperadas.

### 3. PROCEDIMENTO NUMÉRICO

As equações constitutivas do modelo representadas pela Eq. (1) foram discretizadas pelo método dos volumes finitos utilizando o arranjo co-localizado de variáveis, Maliska (1995). Para avaliar as propriedades e seus gradientes nas faces de cada volume de controle foi empregando o esquema WUDS (Weight Upstream Differencing Scheme), Raithby e Torrance (1974). Integrando a Eq. (1) no volume de controle tracejado da Fig. 2 e no tempo, obtém-se a seguinte equação algébrica para  $\phi$ ,

$$A_p \mathbf{f}_p = A_E \mathbf{f}_E + A_W \mathbf{f}_W + A_N \mathbf{f}_N + A_S \mathbf{f}_S + A_{NE} \mathbf{f}_{NE} + A_{NW} \mathbf{f}_{NW} + A_{SE} \mathbf{f}_{SE} + A_{SW} \mathbf{f}_{SW} + B^f \tag{3}$$

onde, por exemplo  $A_e$  e  $A_p$  são dados por,

$$A_e = -\dot{M}_e \left( \frac{1}{2} - \bar{a}_e \right) + \frac{C_{1e} \bar{b}_e \Delta \mathbf{h}}{\Delta \mathbf{x}} - \frac{(C_{2n} - C_{2s}) \Delta \mathbf{h}}{4 \Delta \mathbf{x}} \tag{4}$$

$$A_p = \sum (A_{nb}) + \frac{M_p^o}{\Delta t} \tag{5}$$

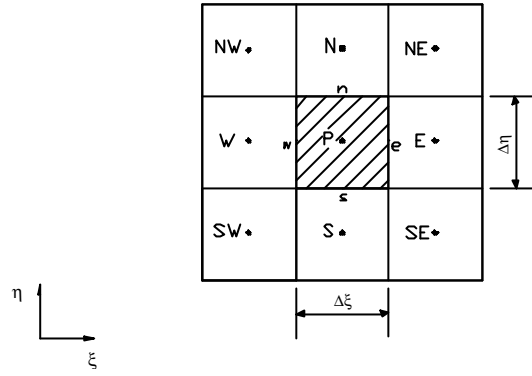


Fig. 2 – Volume de controle no plano transformado

#### 4. EQUAÇÃO PARA A PRESSÃO

Integrando-se a equação de conservação da massa em regime permanente no volume de controle da Fig. 3, obtém-se

$$(U_e - U_w)\Delta\eta + (V_n - V_s)\Delta\xi = 0 \quad (6)$$

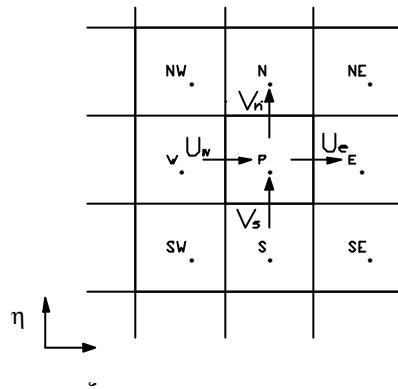


Fig. 3 – Volume de controle para conservação da massa

Observa-se da Eq. (6) que é necessário o conhecimento das velocidades contravariantes nas faces do volume de controle. Assumindo que as velocidades cartesianas sejam obtidas nas faces do volume de controle, pode-se escrever,

$$A_p u_p = A_E u_E + A_W u_W + A_N u_N + A_S u_S + A_{NE} u_{NE} + A_{NW} u_{NW} + A_{SE} u_{SE} + A_{SW} u_{SW} + L[P^u] \ddot{A}V + L[S^u] \ddot{A}V \quad (7)$$

$$A_p v_p = A_E v_E + A_W v_W + A_N v_N + A_S v_S + A_{NE} v_{NE} + A_{NW} v_{NW} + A_{SE} v_{SE} + A_{SW} v_{SW} + L[P^v] \ddot{A}V + L[S^v] \ddot{A}V \quad (8)$$

As Eqs. (7) e (8) podem ser escritas da seguinte forma,

$$u_p = \hat{u}_p - d_p [P^u] \ddot{A}V \quad (9)$$

$$v_p = \hat{v}_p - d_p [P^v] \ddot{A}V \quad (10)$$

onde  $\hat{u}_p$  e  $\hat{v}_p$  contém todos os termos das Eqs. (9) e (10) exceto os termos de pressão. Multiplicando-se  $u$  por  $y_\eta$  e  $v$  por  $-x_\eta$  e similarmente,  $v$  por  $x_\xi$  e  $u$  por  $-y_\xi$  obtém-se,

$$U_p = \hat{U}_p - \left[ \hat{a} \frac{\partial P}{\partial \hat{i}} + \hat{a} \frac{\partial P}{\partial \zeta} \right]_p d_p \quad (11)$$

$$V_p = \hat{V}_p - \left[ \tilde{a} \frac{\partial P}{\partial \hat{i}} + \hat{a} \frac{\partial P}{\partial \zeta} \hat{a}_{22} \right]_p d_p \quad (12)$$

Uma vez que as velocidades  $u$  e  $v$  são armazenadas no centro do volume de controle  $\hat{U}_p$ ,  $\hat{V}_p$ ,  $d_p^u$  também o são. Necessita-se então da extrapolação das velocidades,  $\hat{u}$  e  $\hat{v}$  do centro para as interfaces do volume de controle. Neste trabalho será adotado o procedimento sugerido por Maliska (1995) e Santos et. al. (1995). A expressão para  $\hat{u}_e$  referido a Fig. 4 é dada por

$$\hat{u}_e = \frac{\left[ \sum A_{nb} (u_{NB} - u_p)_p + \sum A_{nb} (u_{NB} - u_p)_E + \sum (A_{nb})_E u_e + \sum (A_{nb})_p u_e + B_u|_p \right] + B_u|_E + \hat{n}^o \frac{\ddot{A}V}{\ddot{A}t}|_p u_e + \hat{n}^o \frac{\ddot{A}V}{\ddot{A}t}|_E u_e}{\left[ \hat{n}^o \frac{\ddot{A}V}{\ddot{A}t}|_p + \hat{n}^o \frac{\ddot{A}V}{\ddot{A}t}|_E + \sum (A_{nb})_E + \sum (A_{nb})_p \right]} \quad (13)$$

Para a obtenção do termo  $d$  nas interfaces dos volumes de controle, adotou-se uma média aritmética dos volumes vizinhos, Maliska (1995).

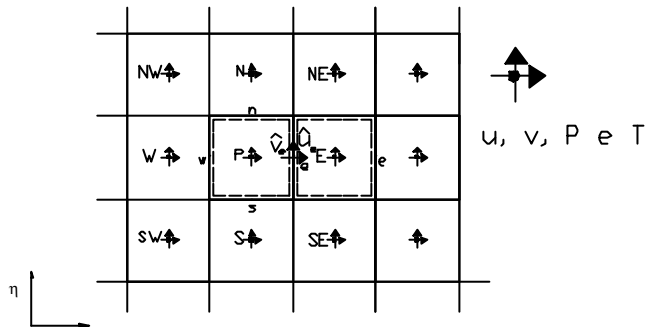


Fig. 4– Esquema dos volumes que entram no cálculo da velocidade  $\hat{u}$

Escrevendo as equações para cada uma das faces do volume de controle e substituindo-se na Eq. (10), obtém-se a seguinte equação para o avanço da pressão,

$$A_p P_p = A_e P_E + A_w P_W + A_n P_N + A_s P_S + A_{ne} P_{NE} + A_{nw} P_{NW} + A_{se} P_{SE} + A_{sw} P_{SW} + B^p \quad (14)$$

#### 4.1 – Procedimento Iterativo

A solução convergente foi obtida, após testes de refino de malha e critérios de convergência, foi usado uma tolerância dada por,

$$\text{tol} \leq \frac{\phi^{k+1} - \phi^k}{|\phi_{\max} - \phi_{\min}|} \quad (15)$$

onde,  $\phi_{\max}$  e  $\phi_{\min}$  denotam a máxima e mínima velocidade nos volumes do domínio, respectivamente, obtidos na iteração  $k$ , e chegou-se ao valor de  $\text{tol}=10^{-5}$ . de modo que a solução

ficasse independente tanto da malha quanto do critério de tolerância, o algoritmo utilizado é dado através dos seguintes passos:

1. Estimar os campos de  $u, v$  e  $T$ ;
2. Calcular os coeficientes e termos fontes das equações de  $u$  e  $v$ ;
3. Resolver a equação para a pressão;
4. Calcular  $U$  e  $V$  nas faces de cada volume de controle;
5. Avaliar  $U$  e  $V$  nos centros de cada volume de controle fazendo uma média das velocidades nas faces;
6. Calcular  $u$  e  $v$  no centro de cada volume de controle;
7. Calcular  $T$ ;
8. Retornar ao item 2 e iterar até que a convergência seja obtida.

## 4.2 – Condições de Contorno

Para a aplicação das condições de contorno foi realizado processo idêntico àquele dos volumes internos, ou seja a realização de balanços para cada volume de controle. Nas paredes foi utilizada a condição de  $\phi$  prescrito e na saída do canal condições de derivada nula para  $U, V$  e  $T$ . Na entrada do canal foi assumido que o fluido entrava com a temperatura externa. Para o cálculo de  $u, v$  na entrada do canal empregou-se o procedimento sugerido em Marcondes e Maliska (1999), ou seja, a Eq. (1) foi integrada para o meio volume de controle apresentado na Fig. 5, resultando numa equação para o cálculo de  $u$  e  $v$ . A pressão na entrada foi calculada via Eq. de Bernoulli,

$$P_{pi} = -0,5 \rho (u_i^2 + v_i^2) \quad (16)$$

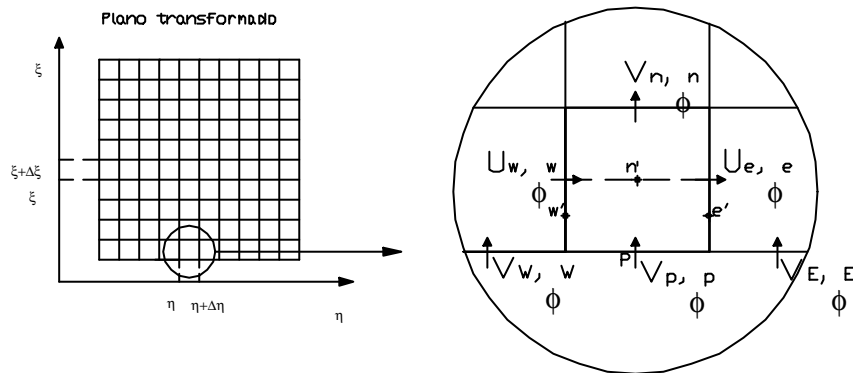


Fig. 5 – Detalhes do meio volume utilizado para a obtenção de  $u$  e  $v$  na entrada do canal

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Antes de apresentar-se os resultados para a configuração parabólica apresenta-se alguns resultados para canais planos com formatos paralelos, convergentes e divergentes com o intuito de validação do código desenvolvido. A Fig. 6 apresenta o número de Nusselt médio obtido para água para canais paralelos, convergentes e divergentes com inclinação de  $5^\circ$  e  $15^\circ$ . Mostra-se também a correlação obtida via análise de dados experimentais fornecida por Sparrow e Ruiz (1988b). Da Fig. 6 pode-se ver que os resultados obtidos apresentam uma excelente concordância com os dados experimentais exceto para o canal paralelo e  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}}$ . Verifica-se na Fig. 6 que o número de Nusselt médio para o canal paralelo com  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}} = 10^8$  apresenta uma larga variação em relação aos dados dos demais canais. Salienta-se que dados do presente trabalho para esta configuração estão em excelente concordância com aqueles apresentados em Sparrow et al. (1988b) em toda a faixa do experimento. Para  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}} = 10^5$ , que foi o máximo valor do experimento, Sparrow et al. (1988) obtiveram o Nusselt médio de 11,72, enquanto que no presente trabalho foi obtido um Nusselt médio de 11,75.

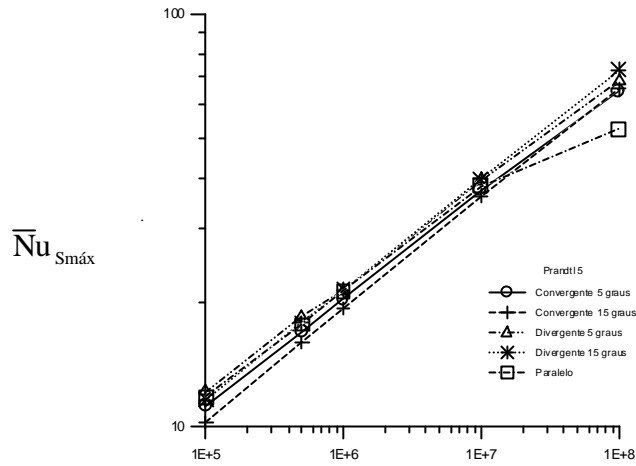


Fig. 6 – Número de Nusselt médio para  $Pr=5$   
 $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}}$

A correlação proposta por Sparrow e Ruiz (1988b) obtida experimentalmente para  $Pr = 5$ , e canais paralelos, convergentes e divergentes é dada por,

$$Nu_{S_{m\acute{a}x}} = 0,740 \left( \left( \frac{S_{m\acute{a}x}}{L} \right) Ra_{S_{m\acute{a}x}} \right)^{0,24} \quad (17)$$

Com o intuito de se verificar o efeito do perfil parabólico na transferência de calor foram utilizados os mesmos valores de  $S_{m\acute{i}n}$ ,  $S_{m\acute{a}x}$  e  $H$  dos canais verticais convergentes/divergentes. Desta forma quando for referenciado, por exemplo, canal convergente parabólico ( $15^\circ$ ), este refere-se ao canal parabólico que foi originado do canal plano convergente ( $15^\circ$ ). A forma dos perfis convergente/ divergente é dada pela seguinte equação,

$$y = cx^2 \quad (18)$$

onde  $c$  é obtido da geometria do canal.

As Figs. 7 e 8 apresentam os vetores velocidade, linhas de corrente e isothermas para os canais parabólicos convergentes e divergentes, respectivamente. Apesar das vazões para canais planos convergentes e divergentes não terem sido reportadas no presente trabalho quando são comparados as vazões máximas para canais planos convergentes/divergentes com os obtidos para canais parabólicos convergentes/divergentes para um mesmo valor de  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}}$  observou-se um decréscimo na vazão succionada em relação aos primeiros. Provavelmente este efeito é ocasionado pelo aumento da distância entre placas dos canais planos em relação aos parabólicos ao longo da altura do canal. Outro ponto que deve ser destacado é o não surgimento das bolsas de recirculação para os canais convergentes ( $5^\circ$  e  $15^\circ$ ) em toda a faixa de estudo. Uma possível causa para esta ocorrência seja o decréscimo na vazão succionada e na área da seção transversal do canal. No entanto, para canais divergentes foi observado que para elevados valores do parâmetro  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}}$  a região central na saída do canal apresenta uma grande zona de recirculação, ocupando quase toda a largura do canal. Observa-se no entanto que esta região apresenta baixas velocidades quando comparada as camadas limites adjacentes à parede. Esta diferença de magnitude do vetor velocidade obviamente é esperado uma vez que a espessura da camada limite térmica apresenta uma pequena espessura. Finalizando apresenta na Fig. 9 o número de Nusselt médio baseado na distância máxima do canal. Apresenta-se também a correlação de Sparrow and Ruiz (1988) para canais planos, Eq. (17). Apesar da Eq. 17 ter sido obtida para canais planos observa-se uma boa concordância para a faixa de  $(S_{m\acute{a}x}/L) Ra_{S_{m\acute{a}x}}$  inferiores a  $10^7$ .

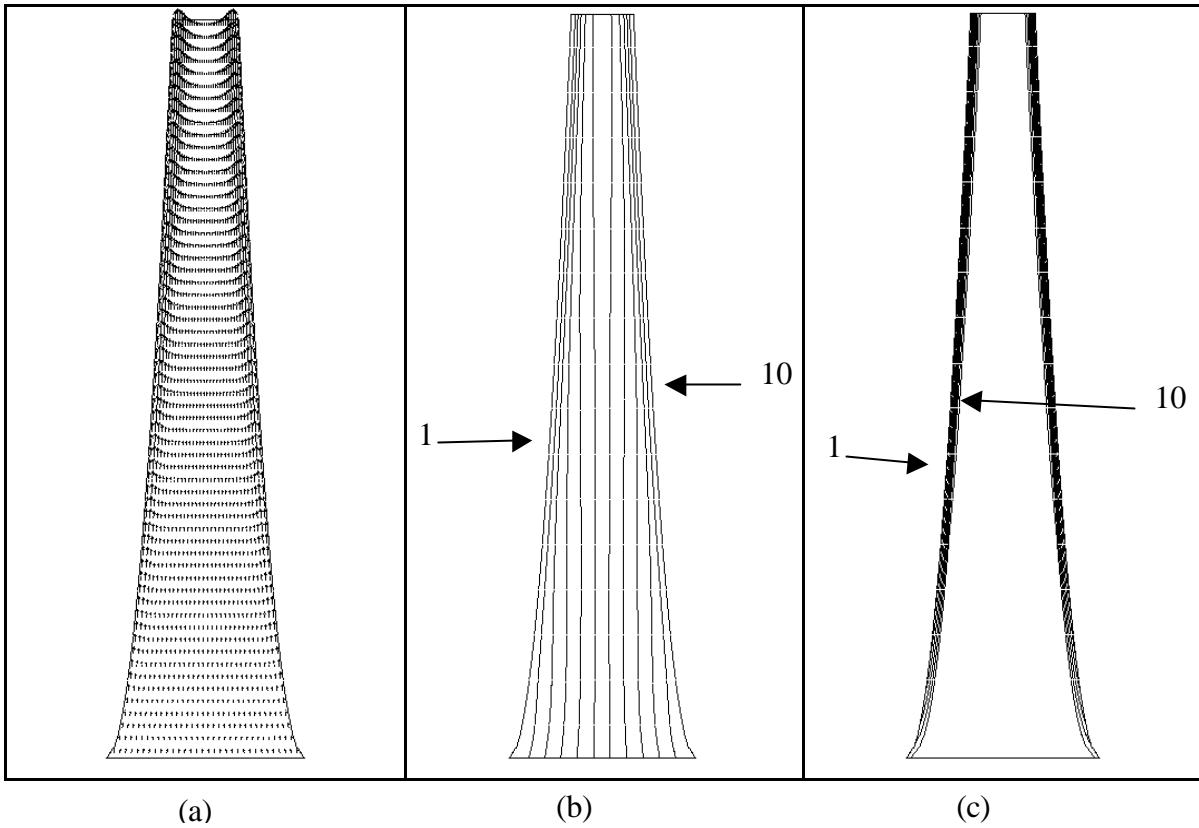


Fig. 7 – Canal vertical parabólico convergente  $5^\circ$ ,  $(S_{\text{máx}}/L)Ra_{S_{\text{máx}}} = 10^7$ ,  $S_{\text{máx}} = 0,03805$  m,  $L=0,1452$ m,  $Pr =5$ , a) Vetores velocidade, b) Linhas de corrente (1-  $1,847727 \times 10^{-5}$ , 10-  $1,847727 \times 10^{-4}$ ); c) Isotermas (1-  $7,85 \times 10^{-1}$ , 10-  $7,85 \times 10^{-2}$ ).

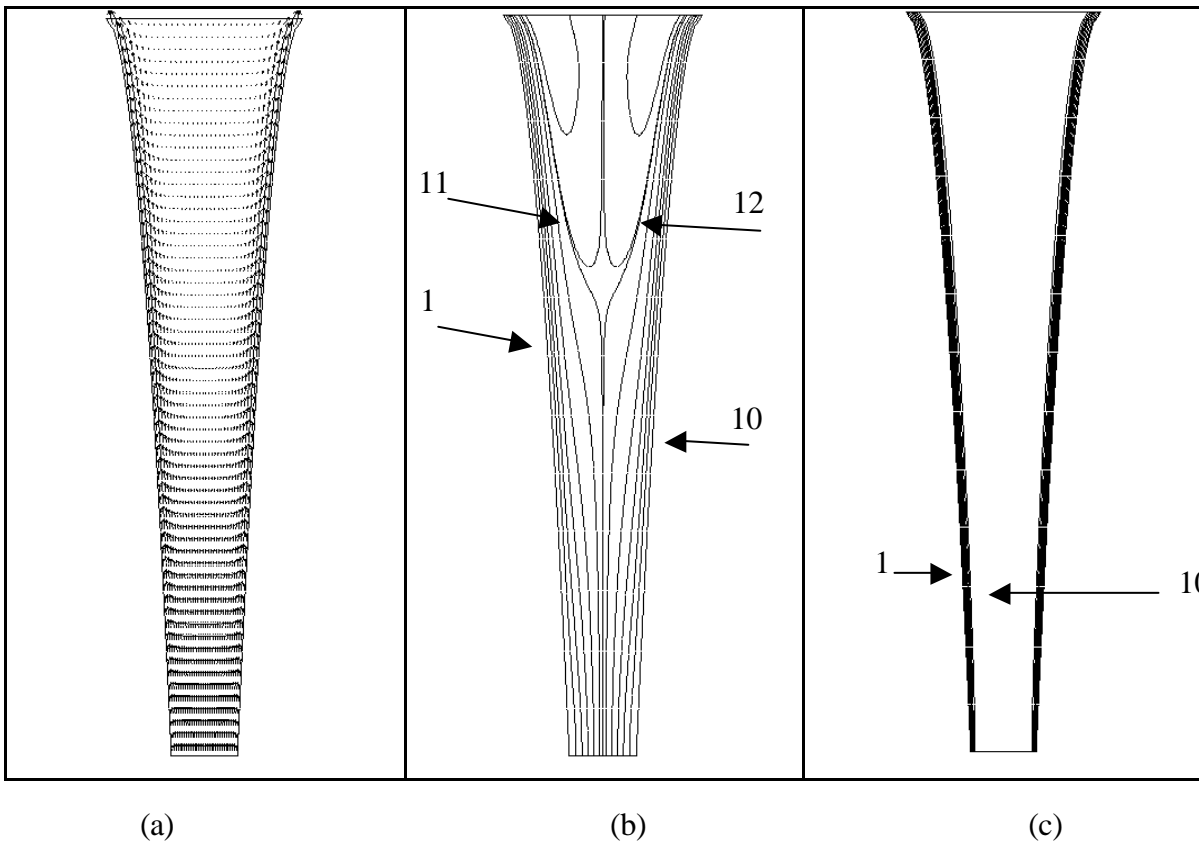


Fig. 8 – Canal vertical parabólico divergente  $5^\circ$ ,  $(S_{\text{máx}}/L)Ra_{S_{\text{máx}}} = 10^7$ ,  $S_{\text{máx}} = 0,03805$  m,  $L=0,1452$ m,  $Pr =5$ , a) Vetores velocidade, b) Linhas de corrente (1-  $1,380909 \times 10^{-5}$ , 10-  $1,380909 \times 10^{-4}$ , 11-  $0,76149 \times 10^{-4}$ , 12-  $0,75709 \times 10^{-4}$ ); c) Isotermas (1-  $6,77 \times 10^{-1}$ , 10-  $6,77 \times 10^{-2}$ ).



A maior diferença obtida (aproximadamente 22%) ocorreu para os canais divergentes ( $5^\circ$  e  $15^\circ$ ) para  $(S_{m\acute{a}x}/L) Ra_{S_{m\acute{a}x}} = 10^8$ .

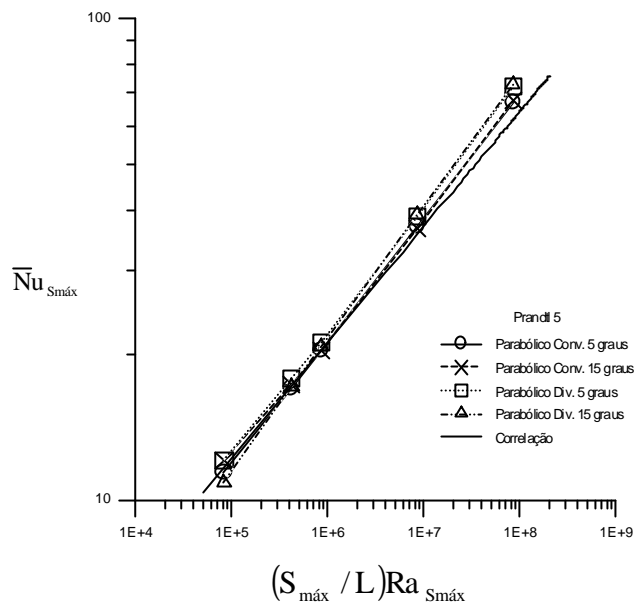


Fig. 9 – Número de Nusselt médio para canais verticais parabólicos, convergentes e divergentes com ângulos de abertura de  $5^\circ$  e  $15^\circ$ ,  $Pr = 5,0$

## 6. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia para a solução elíptica do problema da convecção natural em canais abertos sem a necessidade de extrapolação do domínio de cálculo para fora do canal. As equações foram resolvidas via método dos volumes finitos em coordenadas generalizadas com o arranjo co-localizado de variáveis. Foi proposta uma equação para o avanço das velocidades na entrada do canal, similar àquelas para o cálculo das velocidades internas. A metodologia empregada foi validada para uma série de configurações (canal vertical paralelo, canal convergente/divergente com perfis plano e parabólico). Os testes foram realizados para  $Pr = 5,0$ . Os resultados obtidos para a água, em termos de Nusselt médio, para canais verticais paralelos, convergentes e divergentes, com aquecimento simétrico, estão de acordo com aqueles obtidos experimentalmente. Desta forma, a metodologia proposta foi empregada para estudar o escoamento em canais convergentes e divergentes com perfis parabólicos. Os resultados em termos do número de Nusselt foram comparados com uma correlação obtida a partir de dados experimentais para canais planos e verificou-se que a máxima diferença entre os resultados obtidos e a correlação foi da ordem de 22% para valores elevados de  $(S_{m\acute{a}x}/L)Ra_{S_{m\acute{a}x}}$ . De onde pode-se concluir que para pequenos diferenças no perfil das paredes do canal aquela correlação pode ainda ser empregada.

## 7. REFERÊNCIAS

- Aung, W., Fletcher, L. S., e Sernas, V., 1972, “Developing Laminar Free Convection Between Vertical Flat Plates With Asymmetric Heating”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 15, pp. 2293-2308.
- Aung, W., Worku, G., 1986, “Developing Flow and Flow Reversal in Vertical Channel With Asymmetric Wall Temperatures”, *J. Heat Transfer*, vol. 108, pp. 299-304.
- Bodoia, J. R., e Osterle, J. F., 1962, “The Development of Free Convection Between Heated Vertical Plates”, *J. Heat Transfer*, vol. 84, pp. 40-44.
- Kettleborough, C. F., 1972, “Transient Laminar Free Convection Between Heated Vertical Plates Including Entrance Effects”, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp. 883-896.

- Maliska, C. R., 1995, “*Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional*”, LTC, Rio de Janeiro.
- Maliska, C. R. e Marcondes, F., 1993, “Elliptic Calculations of natural convection flows in arbitrary channels”, Proc. 8<sup>th</sup> Int. Conf. on Laminar and Turbulent Flow, Swansea, UK.
- Marcondes, F. e Maliska, C. R., 1999, “Treatment of the Inlet Boundary Conditions in Natural-Convection Flows in Open-Ended Channels”, *Numerical Heat Transfer, Part B*, vol. 35, pp. :317-345.
- Nakamura, H., Asako, Y., e Naitou, T., 1982, “Heat Transfer by Free Convection Between Two Parallel Flat Plates”, *Numerical Heat Transfer*, vol. 5, pp. 95-106.
- Naylor, D., Florian, J. M. e Tarasuk, J. D., 1991, “A Numerical Study of Developing Free Convection Between Isothermal Vertical Plates”, *J. Heat Transfer*, vol.113, pp. 620-626.
- Nieckele, A. O., e Azevedo, L. F. A., 1987, “Reverse Flow in One Sided Heated Vertical Channels in Natural Convection”, *Winter Annual Meeting of ASME*, Boston, pp. 71-77.
- Raithby, G. D. e Torrance, K. E., 1974, “Upstream-Weighted Differencing Schemes and Their Application to Elliptic Problems Involving Fluid Flow”, *Comp. Fluids*, vol. 2, p. 191-206.
- Santos, L. A., Maliska, C. R. e Marchi, C. H., 1995, “The Prime Method for all Speed flows Using Non-Staggered Grids”, *XIII COBEM*, Belo Horizonte, Minas Gerais.
- Sparrow, E. M., Chrysler, G. M. e Azevedo, L. F., 1984, “Observed Flow Reversals and Measured-Predicted Nusselt Numbers for Natural Convection in a One-Sided Heated Vertical Channel”, *J. Heat Transfer*, vol. 106, pp. 325-332.
- Sparrow, E. M. e Ruiz, R., 1988, “Experimental and numerical investigation of natural convection in convergent vertical channels”, *J. Heat Mass Transfer*, vol. 31, pp. 907-915.
- Sparrow, E. M. e Ruiz, R., “Experiments on Natural Convection in Divergent Vertical Channels and Correlation of Divergent, Convergent, and Parallel-Channel Nusselt Numbers.”, *J. Heat Transfer*, vol.31.

## **NATURAL CONVECTION IN OPEN-ENDED PARABOLIC CONVERGENT AND DIVERGENT CHANNELS**

**Vinícius Souza Melo**<sup>1</sup>

**José Mauricio Gurgel**<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Departamento de Tecnologia Mecânica, 58059-900, João Pessoa, PB, Brasil.

**Celso R.B. Filho**<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, Centro de ciências e Tecnologia, CEP 58102-970, Campina Grande ,PB, Brasil.

**Francisco Marcondes**<sup>3</sup>

<sup>3</sup>Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica e de Produção, 60.455-760, Fortaleza, CE, Brasil. [marconde@dem.ufc.br](mailto:marconde@dem.ufc.br)

**Abstract.** *Natural convection in open-ended channels has been extensively studied in several applications as in the cooling of electronic equipments, solar collectors, among them. Most works have considered the natural convection in vertical parallel channels. Besides, most ones neglect the diffusion terms in the streamwise direction, so a march procedure may be employed. However if flow reversal occurs it may not possible to neglect the diffusion of momentum and energy equations in any direction. In the present work the natural convection in open-ended parabolic convergent and divergent channels is analyzed retained all diffusion terms in the conservation equations. The equations are solved by the finite-volume method using a co-located variable arrangement. The results are present in terms of streamlines, isotherms and average Nusselt number.*

**Key\_words:** *Natural convection, open-ended parabolic channels, co-located arrangement.*