

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM MEIOS HÍBRIDOS PARA ESCOAMENTOS LAMINARES COM RECIRCULAÇÃO

Francisco Dias Rocamora Jr. - e-mail: rocamora@mec.ita.br

Depto. de Energia Nuclear, Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
12231-970, São José dos Campos, SP, Brasil

Marcelo J.S. de-Lemos - e-mail: delemos@mec.ita.br

Depto. de Energia - IEME, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA
12228-900, São José dos Campos, SP, Brasil

***Resumo.** Neste trabalho são apresentados resultados numéricos para problemas de transferência de calor em meios híbridos (meio limpo/meio poroso) para escoamentos laminares com recirculação. Foram considerados escoamentos entre placas planas com inserção de um obstáculo poroso. As equações para o meio poroso e para o meio limpo são resolvidas utilizando um único domínio computacional com as condições de interface apropriadas. As condições de interface para o escoamento seguem as propostas por Ochoa-Tapia e Whitaker (1995), sem considerar 'saltos' na tensão de cisalhamento do fluido na interface. Parâmetros como razão de condutividade térmica do fluido e da matriz porosa, permeabilidade da matriz porosa, porosidade e velocidade do fluido, foram analisados e sua influência sobre o escoamento e transferência de calor são discutidas.*

***Palavras-chave:** Meios Porosos, Transferência de Calor, Métodos Numéricos.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à grande ocorrência de meios porosos em problemas de engenharia tanto em máquinas e equipamentos, *e.g.*, reatores catalisadores, combustão em matrizes porosas, filtros, etc., como em sistemas naturais, *e.g.*, poços de petróleo, contaminação do solo, etc., é também bastante freqüente a ocorrência de situações envolvendo interface entre um meio poroso e um meio limpo. Alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura que tratam da questão da interface, dentre os quais podemos mencionar Kuznetsov (1996), Martin et. al. (1998), Vafai e Tien (1981) e Ochoa-Tapia e Whitaker (1995), entre outros.

Neste trabalho o escoamento laminar em um meio híbrido, *i.e.*, meio poroso e meio limpo (fluido), é tratado em um único domínio de cálculo, utilizando condições de contorno apropriadas na interface. Além disso, o tipo de escoamento analisado, escoamento laminar entre placas planas com um obstáculo poroso inserido no centro, apresenta uma região de recirculação após o obstáculo. Resultados correlatos para a transferência de calor em canais parcialmente preenchidos com meio poroso com (Rocamora & de Lemos, 2000a) e sem

recirculação (Rocamora & de Lemos, 2000b), assim como para escoamento turbulento sobre obstáculos porosos (de Lemos e Pedras, 2000), tem sido documentados.

2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A geometria do problema considerado é mostrada na Fig. 1 abaixo. Ela consiste de placas planas paralelas com uma distribuição de temperatura uniforme e simétrica T_w . Um obstáculo poroso é colocado entre as placas, também de maneira simétrica. Devido à simetria do problema, apenas metade da geometria é mostrada. A distância entre as placas é H e o comprimento do canal é $L=5H$. O obstáculo possui um comprimento de $0.2L$ e uma altura de $H/2$.

O fluido entra no canal pelo lado esquerdo com uma temperatura T_{in} e uma velocidade U_{in} uniformes.

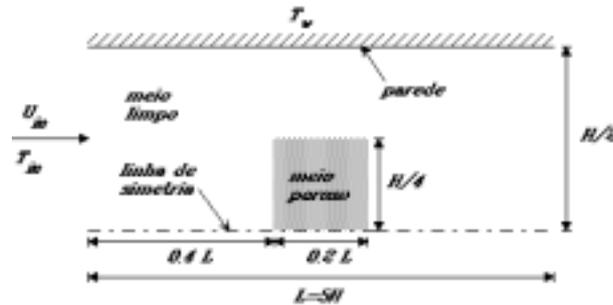


Figura 1 - Geometria do Problema

3. EQUAÇÕES DO ESCOAMENTO

Para o escoamento considerado, as equações de continuidade, momentum e energia podem ser escritas como:

$$\text{div}(\rho \vec{u}_D) = 0 \quad (1)$$

$$\text{div}\left(\rho \frac{\vec{u}_D U_{D_i}}{\phi} - \vec{t}_i\right) = s_{u_i} \quad (2)$$

$$\text{div}\left(\rho \vec{u}_D T - \frac{k_{eff}}{c_{pf}} \text{grad}(T)\right) = s_T \quad (3)$$

onde ρ é a densidade do fluido, \vec{u}_D é a velocidade superficial média (velocidade de Darcy ou 'seepage'), U_{D_i} é a componente de \vec{u}_D na direção i , k_{eff} é a condutividade térmica efetiva do meio poroso saturado, c_{pf} é o calor específico do fluido e T é a temperatura média superficial do meio poroso, considerando o fluido e a matriz porosa em equilíbrio térmico local. Na Eq. (2) a componente da tensão \vec{t}_i é definida como:

$$\vec{t}_i = \tau_{ij} \vec{t}_j \quad (4)$$

onde

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_{D_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial U_{D_j}}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

e o termo fonte, s_{u_i} , o qual inclui a contribuição de Darcy-Forchheimer, é dado por:

$$s_{u_i} = - \left(\frac{\partial \phi P}{\partial x_i} + \frac{\phi \mu}{K} U_{D_i} + \frac{\phi \rho c_F |\vec{u}_D|}{\sqrt{K}} U_{D_i} \right) \quad (6)$$

onde K é a permeabilidade do meio poroso, c_F é o coeficiente de arrasto de forma (coeficiente de Forchheimer), P é a pressão média intrínseca do fluido e ϕ é a porosidade do meio poroso. Combinando as Eqs. (2), (4), (5) e (6) obtemos então a equação do momentum linear na direção i . Esta forma combinada é a expressão comumente encontrada na literatura.

É interessante notar que as equações dadas acima são válidas também para o meio limpo, fazendo $\phi=1$ e retendo apenas o termo do gradiente de pressão em s_{u_i} .

As condições de contorno na interface entre o meio poroso e o meio limpo são tratadas seguindo o proposto por Ochoa-Tapia e Whitaker (1995), e podem ser expressas como:

$$\vec{u}_{D, \text{meio limpo}} = \vec{u}_{D, \text{meio poroso}} \quad (7)$$

$$P_{\text{meio limpo}}^f = P_{\text{meio poroso}}^f \quad (8)$$

$$\frac{1}{\phi} \frac{\partial U_{D//, \text{meio poroso}}}{\partial n} - \frac{\partial U_{D//, \text{meio limpo}}}{\partial n} = \frac{\beta}{\sqrt{K}} U_{D//, \text{meio poroso}} \quad (9)$$

onde $U_{D//}$ é a componente da velocidade superficial média paralela à interface, n é a coordenada normal à interface no sentido do meio poroso para o meio limpo, e β é um coeficiente o qual expressa a condição de ‘salto’ da tensão na interface. Para todos os casos tratados neste artigo o coeficiente β foi considerado nulo, *i.e.*, $\beta=0$.

A condutividade térmica efetiva, k_{eff} , do meio poroso saturado é dada por:

$$k_{eff} = k_f \phi + k_s (1 - \phi) \quad (10)$$

onde k_f e k_s são as condutividades térmicas do fluido e do sólido, respectivamente.

4. SOLUÇÃO NUMÉRICA E RESULTADOS

A solução numérica das equações do escoamento dadas acima é obtida através de um programa computacional utilizando Volumes Finitos e Coordenadas Generalizadas e o método SIMPLE de Patankar (1980), com um arranjo co-localizado. A malha computacional

utilizada em todos os casos foi de 100x40 volumes e os resultados foram considerados convergidos quando o maior resíduo para qualquer variável foi inferior a 10^{-5} .

Um caso teste foi resolvido e comparado com o resultado analítico de Kuznetsov (1996) para o perfil de velocidade de um escoamento desenvolvido entre placas paralelas com camadas porosas de $\frac{1}{4}$ da distância entre as placas de espessura, aderidas às paredes. Os resultados são mostrados na Fig 2. Para este caso foram utilizados os seguintes valores numéricos: $c_F = 0.$, $\phi=0.5$, $K=1.0 \times 10^{-6} \text{m}^2$, $H=0.02\text{m}$, $L=0.20\text{m}$ e $U_{in}=0.10\text{m/s}$. A concordância entre os resultados mostrou-se bastante boa.

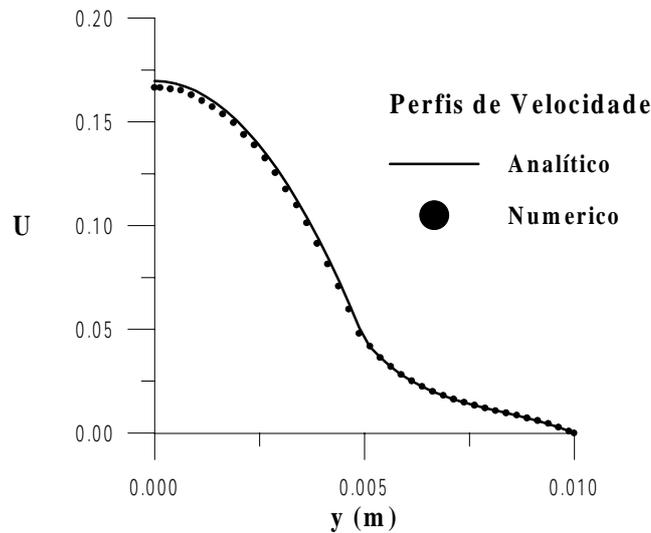


Figura 2 - Perfil de velocidade para o caso teste.

Tabela 1- Valores dos Parâmetros considerados

L (m)	0.10
H (m)	0.02
c_F	0.55
T_{in} ($^{\circ}\text{C}$)	50.0
T_w ($^{\circ}\text{C}$)	100.0
Fluido	ar
Pr	0.7
μ (Ns/m ²)	$1.8 \cdot 10^{-5}$
ρ (Kg/m ³)	1.25

Para os casos que se seguem são apresentados alguns perfis de velocidade e temperatura para o canal mostrado na Fig. 1, bem como alguns campos de velocidade e temperatura. A Tabela 1 mostra os valores dos parâmetros mantidos fixos para esses casos.

i) Perfis de velocidade e temperatura ao longo do canal para $U_{in}=0.10$ m/s, $\phi=0.2$, $K=10^{-8}$ m² e $k_s/k_f=1.0$.

As figuras 3 e 4 mostram o comportamento dos perfis de velocidade e temperatura para várias estações ao longo do canal. Para os valores dos parâmetros considerados, nota-se que o perfil de velocidade para $L/H=3.57$ apresenta valores negativos indicando que existe recirculação após o obstáculo. Nota-se também que na linha de centro (simetria) o perfil de temperatura para a mesma estação apresenta um ligeiro aumento.

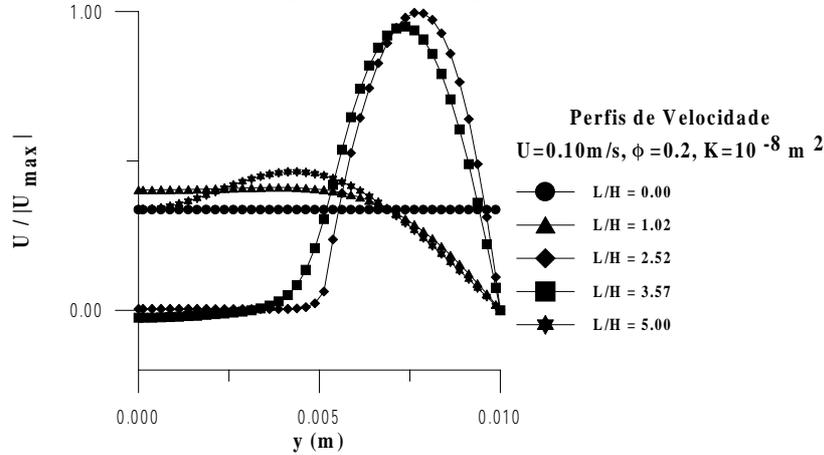


Figura 3 Perfis de velocidade ao longo do canal.

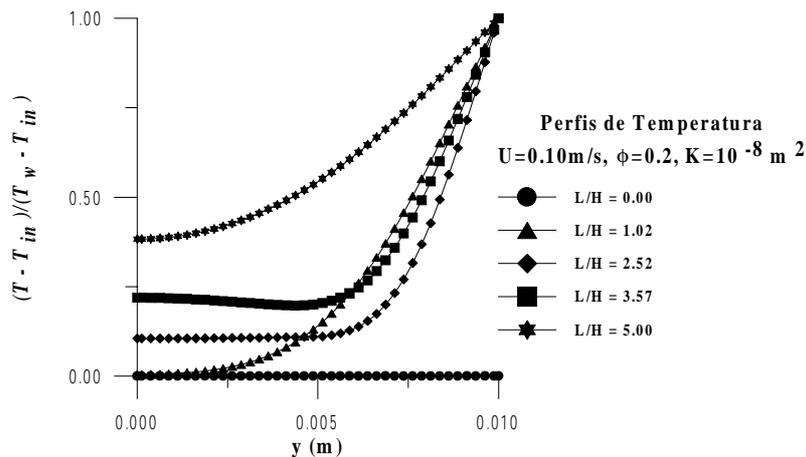


Figura 4 Perfis de temperatura ao longo do canal.

ii) Perfis de velocidade e temperatura em $L/H=2.52$ para $U_{in}=0.10$ m/s, $\phi=0.8$ e $k_s/k_f=1.0$.

As figuras 5 e 6 apresentam perfis de velocidade e temperatura para a estação $L/H=2.52$, situada praticamente na metade do comprimento do canal, passando portanto através do meio poroso. Dois valores para a permeabilidade do meio poroso foram utilizados, $K=10^{-8}m^2$ e $K=10^{-6}m^2$. Observa-se que a permeabilidade exerce grande influência sobre o perfil de velocidade e, conseqüentemente, também sobre o perfil de temperatura. Para uma permeabilidade $K=10^{-8}m^2$, a velocidade no meio poroso é praticamente nula, sendo o escoamento quase todo desviado ao redor do obstáculo poroso. Já para $K=10^{-6}m^2$, uma parcela relativamente alta do escoamento ocorre através do meio poroso, inclusive, para os valores dos parâmetros utilizados para este caso, fazendo com que a bolha de recirculação atrás do obstáculo desapareça.

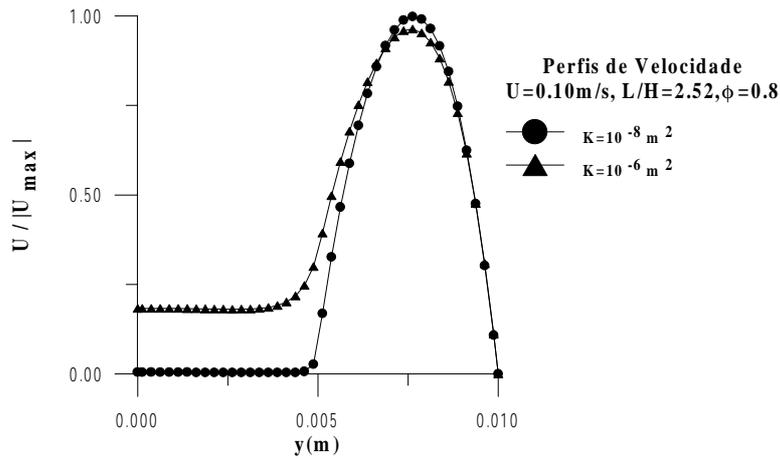


Figura 5 Perfis de velocidade para o caso *ii*.

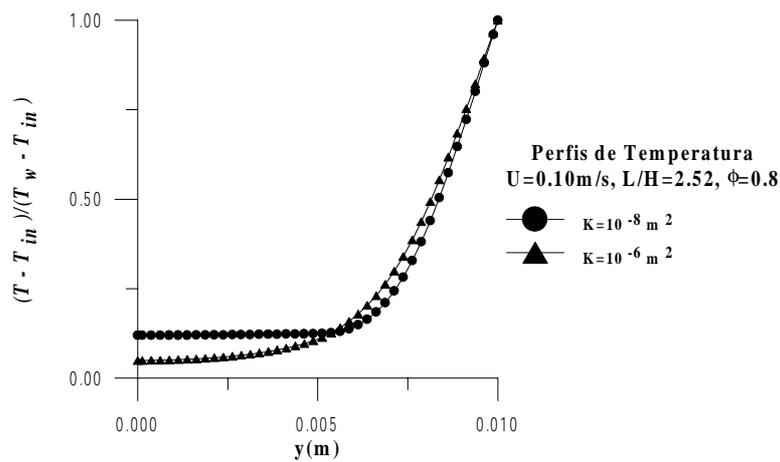


Figura 6 Perfis de temperatura para o caso *ii*.

iii) Perfis de temperatura em $L/H=2.52$ para $U_{in}=0.10\text{ m/s}$, $\phi=0.8$, $K=10^{-6}\text{ m}^2$.

A Fig. 7 mostra perfis de temperatura para dois valores da razão entre as condutividades térmicas do sólido e do fluido, $k_s/k_f=1.0$ e $k_s/k_f=10.0$. É aparente o efeito de achatamento do perfil de temperatura para maiores valores da razão k_s/k_f .

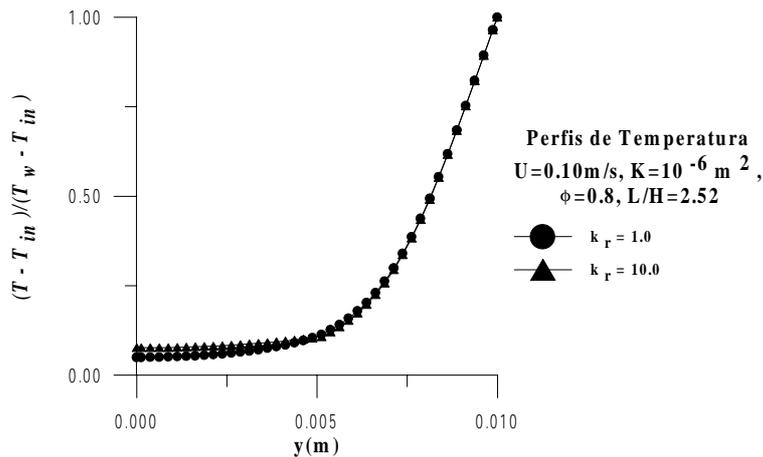


Figura 7 Perfis de temperatura para o caso *iii*.

iv) Campos de velocidade e temperatura para $U_{in}=0.10\text{ m/s}$, $\phi=0.8$ e $k_s/k_f=1.0$.

Nas figuras 8 a 11 são apresentados campos de velocidade e temperatura para dois valores da permeabilidade do meio poroso, $K=10^{-8}\text{m}^2$ e $K=10^{-6}\text{m}^2$. Como mencionado no caso *ii*, verifica-se que para $K=10^{-8}\text{m}^2$ a bolha de recirculação está presente mas para $K=10^{-6}\text{m}^2$ ela é suprimida. Nas figuras apresentando campos de velocidade os vetores são representados todos do mesmo tamanho para uma melhor visualização. No entanto, deve-se observar que as velocidades no meio poroso para $K=10^{-8}\text{m}^2$ são quase nulas como mostrado na Fig. 5. Nas figuras apresentando campos de temperatura pode-se notar o efeito dos campos de velocidade sobre os mesmos, *i.e.*, quanto menor a permeabilidade (menor velocidade no meio poroso), mais achatados os perfis de temperatura.

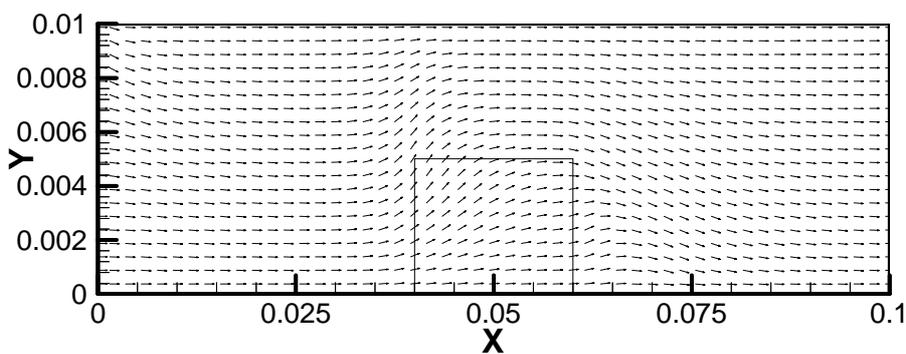


Figura 8 Campo de velocidade para $K=10^{-6}\text{m}^2$.

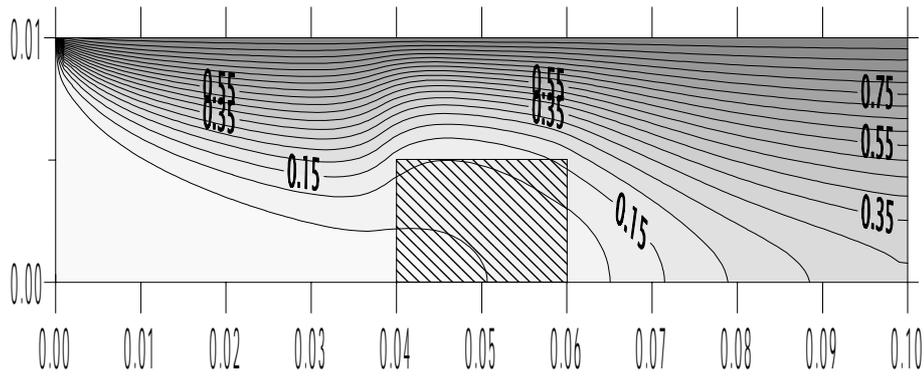


Figura 9 Campo de temperatura para $K=10^{-6}m^2$.

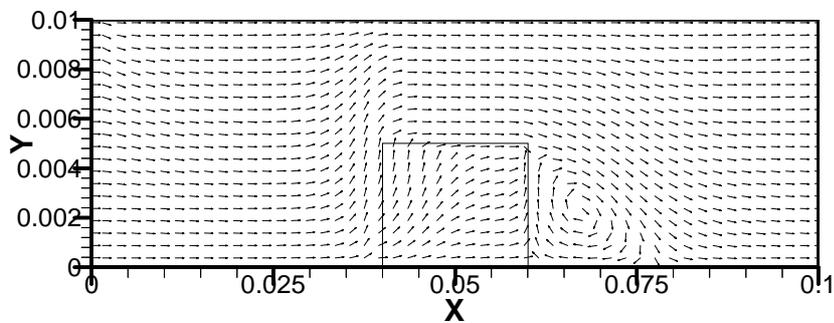


Figura 10 Campo de velocidade para $K=10^{-8}m^2$.

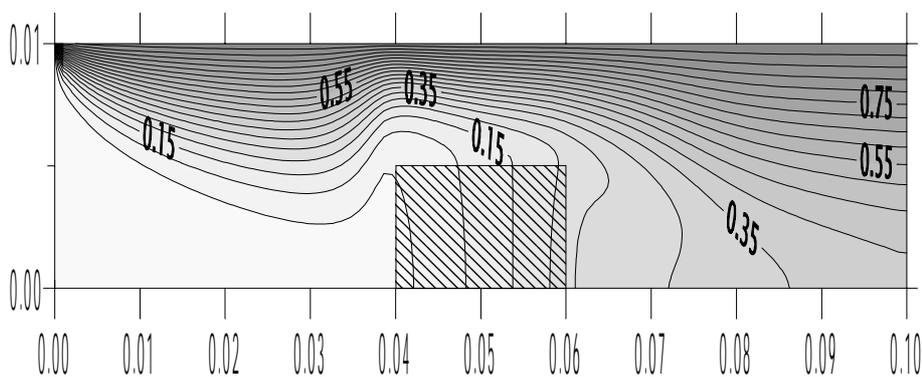


Figura 11 Campo de temperatura para $K=10^{-8}m^2$.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados resultados numéricos para escoamentos laminares em meios híbridos (meio limpo/meio poroso), utilizando um único domínio computacional. A geometria do problema estudado permitiu a análise da influência de vários parâmetros de

interesse, mostrando inclusive casos em que a recirculação pode ou não ocorrer, dependendo dos valores dos parâmetros considerados (no caso, a permeabilidade).

Agradecimento

MJSdL é grato ao CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Brasil, pela ajuda financeira durante a preparação deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Cheng, P., Hsu, C.T., 1990, Thermal Dispersion in a Porous Medium, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 33, pp. 2635-2646.
- Cheng, P., Hsu, C.T., 1999, The Effective Stagnant Thermal Conductivity of Porous Media with Periodic Structures, *Journal of Porous Media*, vol. 2(1), pp. 19-38.
- de Lemos, M.J.S., Pedras, M.H.J., 2000, Simulation of Turbulent Flow Through Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Domains, *aceito para apresentação no IMECE2000 - ASME - Intern. Mech. Eng. Congr.*, Orlando, FL, EUA, Nov. 5-10.
- Kuwahara, F., Nakayama, A., 1998, Numerical Modelling of Non-Darcy Convective Flow in a Porous Medium, *Proceedings of 11th IHTC*, August 23-28, Kyongju, Korea, vol. 4, pp. 411-416.
- Kuznetsov, A.V., 1996, Analytical investigation of the fluid flow in the interface region between a porous medium and a clear fluid in channels partially filled with a porous medium, *Applied Scientific Research*, vol. 56, pp. 53-67.
- Martin, A.R.; Saltiel, C.; Shyy, W., 1998, Heat Transfer Enhancement with Porous Inserts in Recirculating Flows, *Journal of Heat Transfer*, vol. 120, pp. 458-467.
- Ochoa-Tapia, J.A.; Whitaker, S., 1995, Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid- I Theoretical development, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 38, pp. 2635-2646.
- Patankar, S.V., 1980, NUMERICAL HEAT TRANSFER AND FLUID FLOW, Mc-Graw Hill, New York.
- Rocamora Jr., de Lemos, M.J.S., 2000a, Laminar Recirculating Flow And Heat Transfer In Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Computational Domains, *Heat and Mass Transfer in Porous Media*, **Paper NHTC2000-12317**, 34th National Heat Transfer Conference, August 20-22, 2000, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Rocamora Jr., F.D., de Lemos, M.J.S., 2000b, Campo de Velocidade e Temperatura em Meio Híbrido Formado por Regiões Limpa e Porosa, *aceito para apresentação no CONEM2000 - National Mechanical Engineering Congress*, Natal, Rio Grande do Norte, 7 a 11 de agosto.
- Vafai, K., Tien, C.L., 1981, Boundary and Inertia Effects on Flow and Heat Transfer in Porous Media, *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 24, pp. 195-203.

Abstract. *This work presents numerical solutions for flow and heat transfer in hybrid media (clear/porous medium). Laminar flow between parallel plates with recirculation induced by a porous obstacle was considered. The flow governing equations for both clear and porous media were solved using a single computational domain and appropriate interface boundary conditions. The theory proposed by Ochoa-Tapia e Whitaker (1995) was applied for considering the jump conditions at the interface. The influence of several parameters on flow and heat transfer, such as the thermal conductivity ratio, permeability, porosity and fluid superficial velocity, was discussed.*