

EFEITO DA POROSIDADE E DA PERMEABILIDADE NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CANAIS CONTENDO OBSTRUÇÕES POROSAS

Nicolau B. Santos¹

Marcelo J.S. De-Lemos^{2*}

Departamento de Energia – IEME

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

12228-900 - São José dos Campos, SP - Brasil

* Autor para correspondência, ¹nicolau@mec.ita.br, ²delemos@mec.ita.br

Resumo. O presente trabalho apresenta uma análise quantitativa, da influência da permeabilidade e da porosidade sobre a transferência de calor e escoamento, num canal formado por placas paralelas com obstruções porosas. Verificou-se que para o caso estudado, não há um aumento efetivo da transferência de calor ao se utilizar obstruções porosas. Além disso, a permeabilidade influencia sobremaneira o número de Nusselt e o fator de atrito, por sua vez a porosidade pouco contribui.

Palavras chave: escoamento laminar, meio poroso, solução numérica, transferência de calor

1. INTRODUÇÃO

O escoamento de fluidos em canais contendo obstáculos sólidos ou porosos apresentam inúmeras aplicações tecnológicas. Exemplos são os trocadores de calor, onde o uso de chicanas e aletas melhoram a transferência de calor, misturando os fluidos e aumentando a área de troca, incrementando assim a eficiência térmica do equipamento.

Berner, et. al. (1984), utilizando técnicas manométricas e de anemometria por laser-doppler, visualizaram experimentalmente o escoamento bidimensional em canais contendo obstruções igualmente espaçadas, com $L/H = 1$, h/H variando entre 0,9 e 0,5 e Re entre 600 e 10.500, conforme indicado na Fig. (1).

Kelkar & Patankar (1987), realizaram uma análise numérica da transferência de calor e do escoamento em um canal modelado como placas paralelas infinitas na presença de obstruções sólidas. Os autores focaram seus estudos na região laminar, a qual julgaram se encontrar abaixo de $Re = 600$, sendo essa faixa baseada nas visualizações apresentadas por Berner, et. al. (1984). Os autores determinaram a variação da perda de carga e da transferência de calor para um canal com $h/H = 0,5$. Essa variação foi avaliada em relação ao número de Nusselt, \overline{Nu}_0 , e fator de atrito, $(f Re)_0$, os quais se referem a um canal limpo. O número de Reynolds considerado foi baseado no diâmetro hidráulico do canal ($D_h = 2H$).

Lopez, et. al (1996), efetuaram uma investigação numérica do escoamento e da transferência de calor em um canal tridimensional com obstruções sólidas. Os autores trabalharam no regime laminar ($150 < Re < 450$) e verificaram a influência da tridimensionalidade no número de Nusselt (\overline{Nu}) e no fator de atrito (f) das relações de obstrução e do número de Prandtl (Pr) no escoamento dentro da região considerada espacialmente periódica.

Santos & de Lemos (2004) realizaram uma análise numérica do escoamento com transferência de calor em um canal contendo 16 obstruções, sendo essas sólidas ou porosas ($K = 10^{-9} m^2$ e $f = 0,40$). Os resultados obtidos para regime laminar permanente com um fluido monofásico, indicaram que essa estrutura porosa se aproxima bem de uma estrutura sólida, e que ambas eram deficitárias em relação ao meio limpo. Esse comportamento fora anteriormente descrito por Rowley & Patankar (1983) para uma geometria circular, onde os autores concluíram que para escoamentos laminares a baixos números de Pr , a inclusão de obstruções prejudica a efetividade do canal, e que para altos números de Pr , a inclusão de obstruções são benéficas.

Para este artigo, uma análise numérica do escoamento com transferência de calor em um canal igual ao de Santos & de Lemos (2004) que é semelhante ao experimento de Hwang (1997) e a análise numérica de Yang & Hwang (2003), ou seja, com 15 células como a apresentada na Fig. (1b) mais 400mm de canal livre na entrada e saída do domínio computacional. As obstruções possuem relação de condutividade $k/k_f = 10$, $t/H = 0,0375$, $h/H = 0,50$ e $L/H = 1,0$. O número Pr para o fluido é igual a 0,70. A região porosa foi modelada como rígida, homogênea e isotrópica. Os resultados foram obtidos para regime laminar permanente e foi utilizado um fluido monofásico. Usaram-se três permeabilidades e quatro porosidades para a verificação da influência das mesmas sobre os parâmetros de interesse do problema.

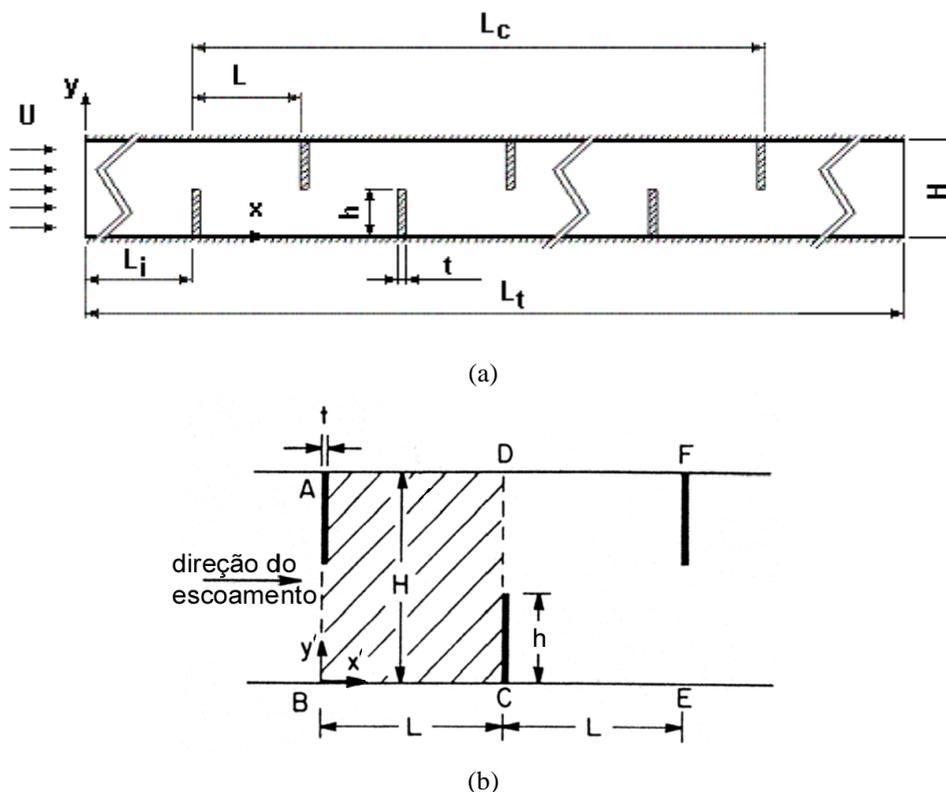


Figura 1. Modelo computacional: a) domínio de cálculo, b) célula de um canal com chicanas.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a resolução numérica de escoamentos em meios porosos, uma série de conceitos pertinentes ao problema, tais como a média volumétrica e intrínseca, o desvio espacial, o teorema da média volumétrica local (TMVL) e as equações macroscópicas de conservação são utilizados tais como foram apresentados nos trabalhos de Pedras e de Lemos (2000, 2001).

Para escoamentos em meios porosos, as equações de conservação assumem a seguinte formulação, para escoamento laminar em regime permanente, sem os efeitos da gravidade:

$$\nabla \cdot \mathbf{u}_D = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{r} \nabla \cdot \frac{\mathbf{u}_D \mathbf{u}_D}{\mathbf{f}} = -\nabla \mathbf{f} \langle p \rangle^i + m \nabla^2 \mathbf{u}_D - \left[\frac{m \mathbf{f}}{K} \mathbf{u}_D + \frac{c_F \mathbf{f} \mathbf{r}}{\sqrt{K}} |\mathbf{u}_D| \mathbf{u}_D \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (\mathbf{r} c_p)_f \nabla \cdot (\mathbf{u}_D \langle T \rangle^i) = \nabla \cdot \left\{ [k_f \mathbf{f} + k_s (1 - \mathbf{f})] \nabla \langle T \rangle^i \right\} + \nabla \cdot \left[\frac{1}{\Delta V} \int_{A_i} \mathbf{n} (k_f T_f - k_s T_s) dS \right] + \\ - (\mathbf{r} c_p)_f \nabla \cdot \left[\mathbf{f} \langle \mathbf{u}^i T_f \rangle^i \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Essas equações são válidas tanto para o meio limpo quanto para a região porosa, com $\langle p \rangle^i$ sendo a média intrínseca da pressão no fluido, \mathbf{u}_D é a velocidade média superficial ou velocidade de Darcy, x e y são as coordenadas cartesianas, m a viscosidade do fluido, T_f a temperatura do fluido, T_s a temperatura do sólido, k_f e k_s as condutividades do fluido e do sólido, \mathbf{f} a porosidade e K a permeabilidade do meio. Para o meio poroso $\langle T_s \rangle^i = \langle T_f \rangle^i = \langle T \rangle^i$.

Usou-se a condição de não escorregamento do fluido nas paredes, a condição de saída plenamente desenvolvida e perfil de velocidade desenvolvido na entrada.

A Equação (1) é a equação da conservação da massa, a Eq. (2) representa a conservação da quantidade de movimento e a Eq. (3) é a equação da energia. O terceiro e o quarto termos à direita da Eq. (2) são os termos de Darcy e Forchheimer, respectivamente. As equações apresentadas se simplificam nas equações particulares ao meio limpo quando f tende a 1 e K tende ao infinito.

A modelagem para a transferência de calor segue a proposta de Rocamora e de Lemos (2001), com os efeitos da interface fluido-meio poroso tratados como apresentado por Silva e de Lemos (2003).

2.1. FATOR DE ATRITO E NÚMERO DE NUSSOLT

Em Fox & McDonald (1998) verifica-se que o fator de atrito em condutos pode ser representada da seguinte forma:

$$f = \frac{\Delta P}{\rho} \frac{D_h}{L} \frac{2}{\bar{U}^2} \quad (4)$$

onde ΔP representa a queda de pressão, \bar{U} é a velocidade média e ρ o densidade do fluido.

Em Idelcik (1960) para uma geometria de placas paralelas infinitas tem-se $(f \text{Re})_0 = 96$. O número de Reynolds é definido como $\text{Re} = \frac{\rho \bar{U} D_h}{\mu}$, onde D_h é o diâmetro hidráulico.

A troca de calor entre o fluido e o material sólido ou poroso, em uma célula como mostrado na Figura 1b), pode ser representada através do número de Nusselt da seguinte forma:

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} D_h}{k_f} \quad (5)$$

onde:

$$\bar{h} = \frac{Q}{(2L)\Delta T_{ml}} \quad (6)$$

$$Q = Q_{célula} = \rho \bar{U} c_p (T_b(0) - T_b(L)) \quad (7)$$

$$\Delta T_{ml} = \Delta T_{ml(célula)} = \frac{(T_w - T_b(L)) - (T_w - T_b(0))}{\ln[(T_w - T_b(L))/(T_w - T_b(0))]} \quad (8)$$

$$T_b(x') = \frac{\int_0^H u T dy'}{\int_0^H u dy'} \quad (9)$$

Essa formulação leva em consideração o calor transferido (Q) ao escoamento através das superfícies com temperatura constante T_w , e a variação da energia do escoamento representada pela variação da temperatura média ponderada da seção, T_b (temperatura de bulk).

3. MÉTODO NUMÉRICO

As Equações (1), (2) e (3), sujeitas às condições de contorno e de interface, foram discretizadas para um domínio bidimensional, envolvendo ambos os meios limpo e poroso. A discretização das equações usa um sistema de coordenadas generalizadas. O método dos volumes finitos foi empregado na discretização e o algoritmo SIMPLE, Patankar (1980), foi utilizado para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade.

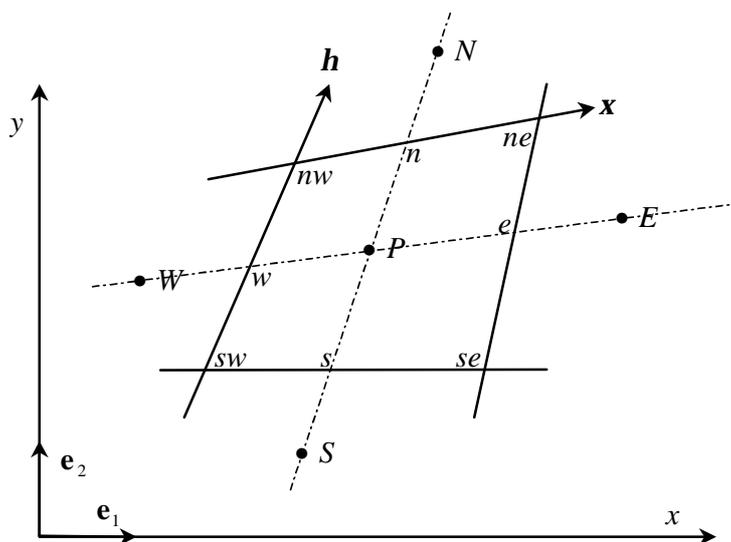


Figura 2. Volume de controle e sua discretização nas coordenadas generalizadas.

A Figura (2) apresenta um volume de controle típico juntamente com o sistema de coordenadas generalizadas, $\mathbf{h}-\mathbf{x}$. A forma geral e discretizada da equação de conservação bidimensional de uma propriedade genérica \mathbf{j} , em regime permanente, é dada por:

$$I_e + I_w + I_n + I_s = S_j \quad (10)$$

onde I_e , I_w , I_n e I_s representam, respectivamente, os fluxos de \mathbf{j} nas faces leste, oeste, norte e sul do volume de controle e S_j o seu termo fonte.

Sempre que o termo fonte for dependente de $\langle \mathbf{j} \rangle^i$, este será linearizado da seguinte forma:

$$S_j \approx S_j^{**} \langle \mathbf{j} \rangle_p^i + S_j^* \quad (11)$$

Os termos fonte nas equações de momentum para a direção x são dados por:

$$S^{*x} = (S_e^{*x})_p - (S_w^{*x})_p + (S_n^{*x})_p - (S_s^{*x})_p + S_p^* \quad (12)$$

$$e \quad S^{**x} = S_f^{**} \quad (13)$$

onde S^{*x} é a parte difusiva tratada de forma explícita. O termo S^{**x} na equação para o meio poroso é composto pelo coeficiente do termo de Darcy na direção x .

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A malha utilizada foi a mesma de Santos & de Lemos (2004), ou seja, 1507x200 volumes de controle. Os resíduos numéricos normalizados foram levados a valores inferiores a 10^{-6} .

A periodicidade espacial foi verificada para os casos aqui apresentados, e condizem com o apresentado em Santos & de Lemos (2004) e Berner, *et. al.* (1984), dessa forma tem-se que o comportamento do escoamento e a transferência de calor podem ser considerados espacialmente periódicos a partir da sétima célula. Em decorrência dessa verificação os autores optaram estudar o comportamento da nona célula. Uma célula característica do canal pode ser visto na Fig.(1b).

Para esse trabalho foram utilizadas três permeabilidades e quatro porosidades. Os efeitos da permeabilidade no escoamento podem ser observados na Fig.(3). Nessa figura pode ser notado que o comportamento das linhas de corrente se aproxima ao das linhas de corrente de um canal limpo, para uma permeabilidade de $K=10^{-5} m^2$. Porém, o interessante é perceber que as variações na permeabilidade são bastante significativas.

Na Figura (4) é interessante observar, que as alterações na porosidade pouco influenciam no comportamento do escoamento, e que com o aumento da porosidade, há um aumento do y_0 , o qual representa a relação entre a vazão mássica na maior bolha de recirculação e na região de escoamento livre.

As Figura (3) e (4) mostram as linhas de corrente na 10ª e 11ª células.

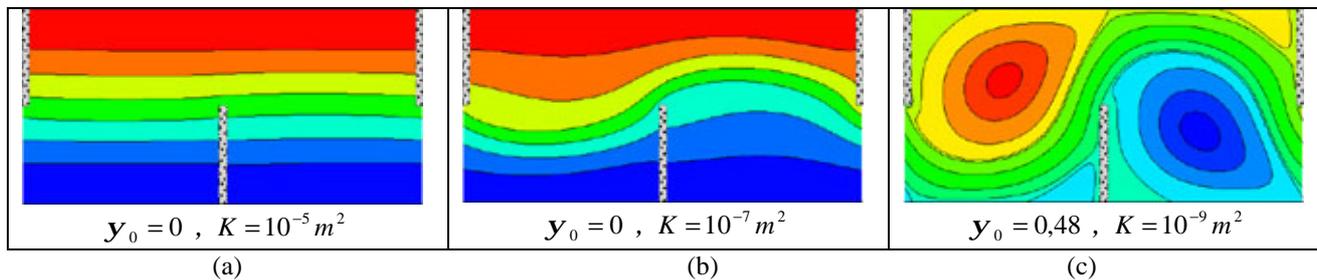


Figura 3. Influência da permeabilidade nas linhas de correntes do escoamento, para uma mesma porosidade $f = 0,90$ e $Re = 500$.

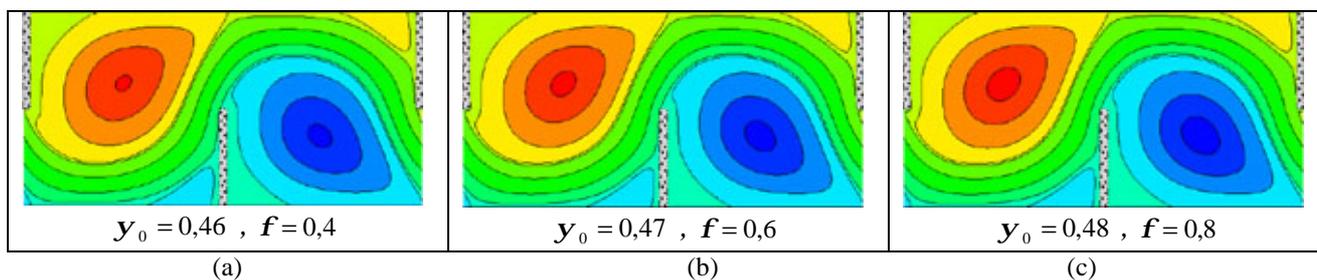


Figura 4. Influência da porosidade nas linhas de corrente do escoamento, para uma mesma permeabilidade $K = 10^{-9} m^2$ e $Re = 500$.

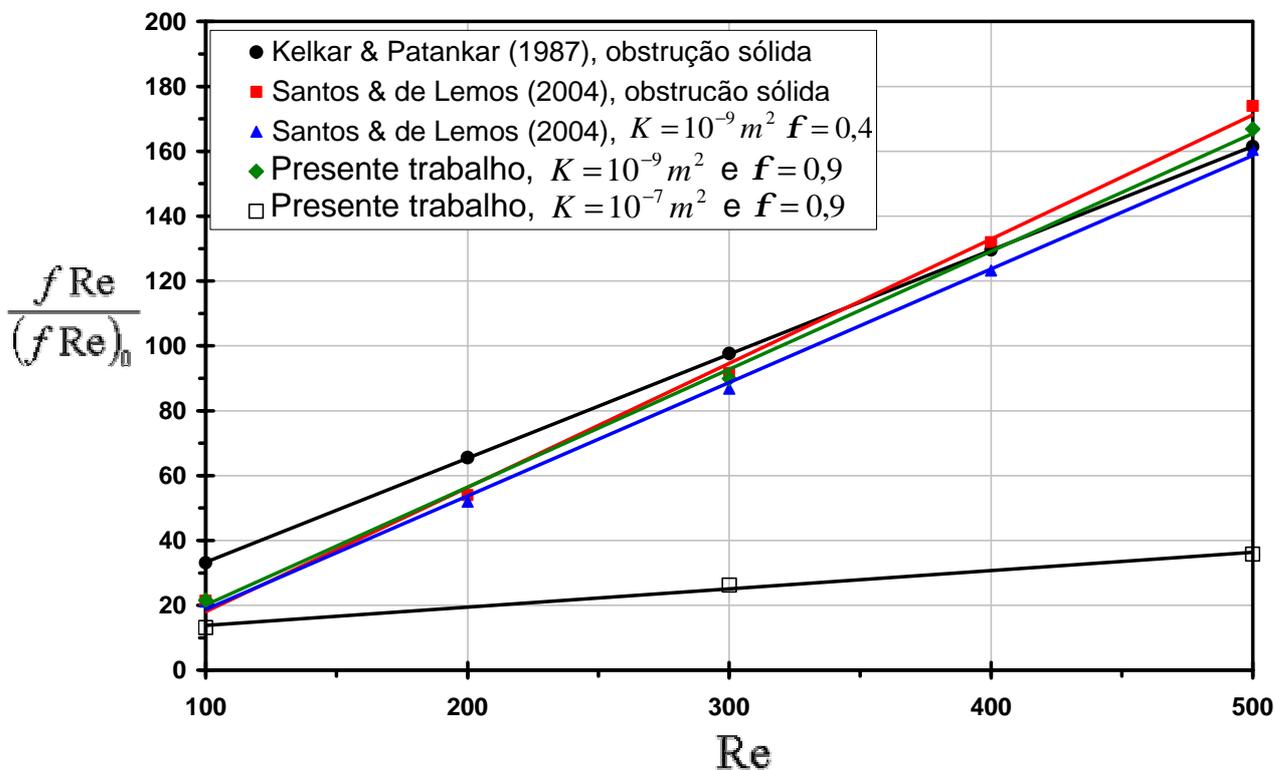


Figura 5. Incremento da perda de carga de um canal obstruído em relação a um canal limpo para vários números de Reynolds. Comparação entre os resultados presentes para obstruções porosas com Kelkar & Patankar (1987) e Santos & de Lemos (2004).

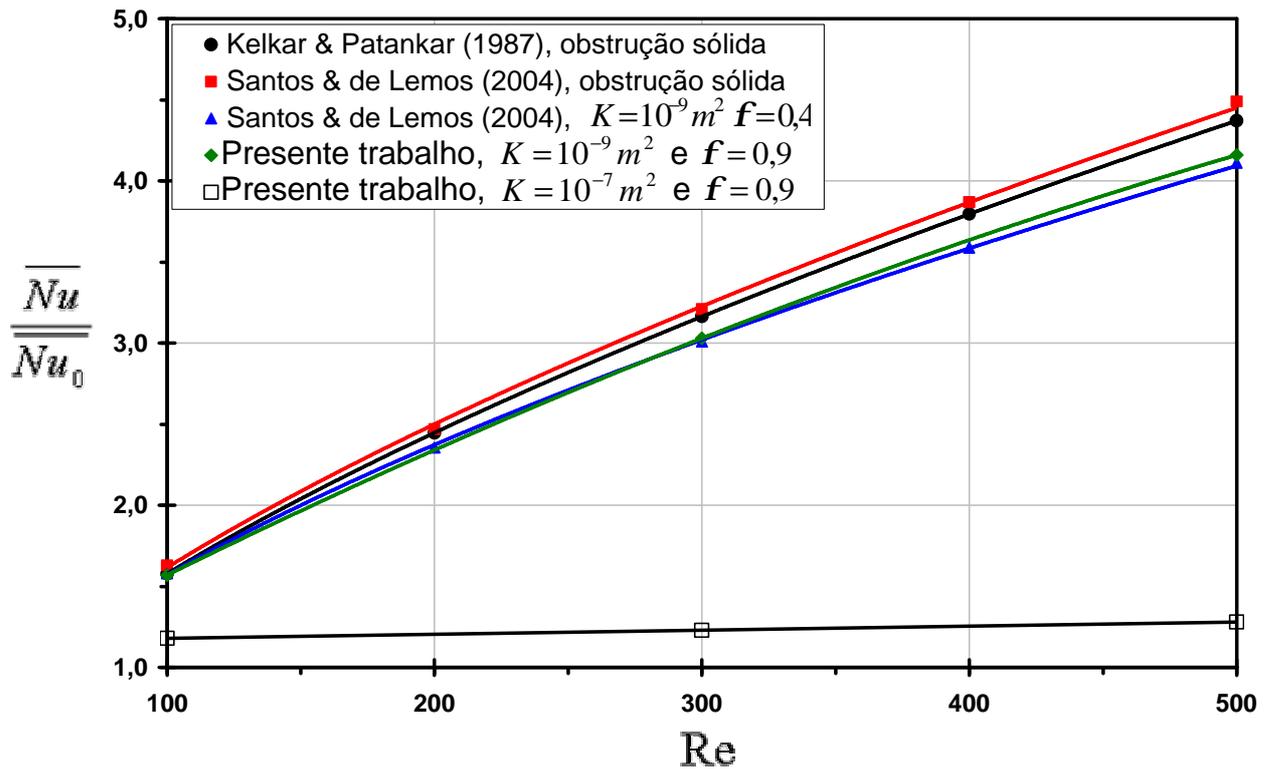


Figura 6. Incremento na transferência de calor de um canal obstruído com relação a um canal limpo para diversos números de Reynolds. Comparação entre os resultados presentes para obstruções porosas com Kelkar & Patankar (1987) e Santos & de Lemos (2004).

As Figura (5 e 6) mostram a influência dos tipos de meios porosos, estudados nesse trabalho, no fator de atrito e na transferência de calor. Na Figura (5) é possível notar uma pequena influência da porosidade, fazendo aumentar o fator de atrito para valores maiores de f , esse efeito já foi apresentado anteriormente por Silva & de Lemos (2002). É nítido o efeito da permeabilidade, reduzindo o fator de atrito com o aumento de K . Da Figura (5) pode-se retirar conclusões similares as anteriores para a transferência de calor, ou seja, a transferência de calor aumenta com a redução da permeabilidade, porém quase não se é notado os efeitos da porosidade.

Tabela 1. Avaliação da influência da permeabilidade e da porosidade na transferência de calor e no escoamento.

Re = 500	$K = 10^{-7} m^2$		$K = 10^{-9} m^2$	
	$(f Re)/(f Re)_0$	$\overline{Nu} / \overline{Nu}_0$	$(f Re)/(f Re)_0$	$\overline{Nu} / \overline{Nu}_0$
0,4	35,1	1,36	160,4	4,11
0,6	35,9	1,33	163,4	4,14
0,8	35,9	1,30	165,9	4,16
0,9	35,8	1,28	166,9	4,16

A Tabela (1) apresenta os efeitos da porosidade e da permeabilidade, confirmando o descrito até aqui. Pode ser verificado o aumento do fator de atrito e a redução da transferência de calor com a porosidade para permeabilidade de $K = 10^{-7} m^2$, e aumento de fator de atrito e transferência de calor com a porosidade para permeabilidade de $K = 10^{-9} m^2$.

Nas Tabelas (2 e 3) são apresentados os resultados obtidos para a relação de performance da transferência de calor $\overline{Nu}^* = (\overline{Nu} / \overline{Nu}_0) / (f / f_0)^{1/3}$, a qual permite realizar uma análise da efetividade de uma obstrução com relação a outra, pois avalia o aumento efetivo da transferência de calor ou, em outras palavras, a redução na potência de bombeamento para se obter a mesma transferência de calor.

Os dados apresentados na Tab. (2) indicam que ao se utilizar uma obstrução porosa com baixa permeabilidade, se aproximando de uma obstrução sólida, o parâmetro \overline{Nu}^* aumenta, e o mesmo ocorre ao se utilizar uma obstrução porosa com alta permeabilidade, pois se aproxima de um canal limpo, indicando a presença de um valor crítico de permeabilidade para o qual se teria a pior situação.

Tabela 2. Avaliação do efeito da permeabilidade e da porosidade no aumento efetivo da transferência de calor.

$\overline{Nu}^*_{Re = 500}$			
f	$K=10^{-5} m^2$	$K=10^{-7} m^2$	$K=10^{-9} m^2$
0.4	0.75	0.42	0.76
0.6	0.71	0.40	0.76
0.8	0.69	0.39	0.76
0.9	0.67	0.39	0.76

A Tabela (3) compara os resultados do presente trabalho com os de Santos & de Lemos (2004), e a partir dela é possível se observar que há um aumento significativo do parâmetro \overline{Nu}^* com o aumento do número de Reynolds, exceto para a porosidade $K = 10^{-7} m^2$, na qual se tem a inversão do comportamento. Essa redução do parâmetro \overline{Nu}^* vem da falta de efeito de mistura, ou em outras palavras, pelo motivo do escoamento com obstrução de permeabilidade $K = 10^{-7} m^2$ ser pouco sinuoso, o que leva as baixas velocidades próximas à parede o que pode ser visto na Fig. (3). Por esse motivo existe a inversão, pois para números de Reynolds mais baixos esse efeito tem menor influência.

Tabela 3. Aumento efetivo da transferência de calor em um canal de placas paralelas com obstrução sólida e porosa, quando comparado com um canal sem obstruções (limpo). ¹Santos & de Lemos (2004)

$\overline{Nu}^* = \left(\overline{Nu} / \overline{Nu}_0 \right) / \left(f / f_0 \right)^{1/3}$				
Re	obstrução sólida ¹	$K=10^{-9} m^2 f=0,4$ ¹	$K=10^{-9} m^2 f=0,9$	$K=10^{-7} m^2 f=0,9$
100	0,59	0,57	0,56	0,50
200	0,65	0,63	-----	-----
300	0,71	0,68	0,68	0,41
400	0,76	0,72	-----	-----
500	0,80	0,76	0,76	0,39

5. CONCLUSÕES

Confirmou-se que para um canal com obstruções porosas, chicanas, o escoamento pode ser considerado espacialmente periódico a partir da sétima célula ou obstrução.

Notou-se que a porosidade tem pouca influência sobre os parâmetros médios do escoamento e da transferência de calor. E que por outro lado a permeabilidade tem um papel importante nos mesmos parâmetros, indicando que em estudos futuros este parâmetro deva ser avaliado com mais detalhamento.

Chegou-se a conclusão de que, para escoamento laminares com $Pr = 0,7$ não há redução significativa na potência de bombeamento ao se substituir obstruções sólidas por porosas, porém há uma perda de potência em relação ao canal limpo, a qual é suplantada para números de $Pr > 4,0$, conforme Kelkar & Patankar (1987). Os autores pretendem, em trabalhos futuros, avaliar a influência do fluido no escoamento (Pr), do material da obstrução (k/k_f) e da geometria (h/H).

6. AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à FAPESP, CNPq e CAPES pelo suporte financeiro durante a preparação deste trabalho.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Berner, C., Dust, F., McEligot, D. M., 1984, "Flow Around Baffles", Journal of Heat Transfer, vol. 106, pp. 743-749.
- Fox, R. W., McDonald, A. T., 1998, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 4ª edição, editora LTC.
- Hwang, J.J., 1997, "Turbulent heat transfer and fluid flow in a porous-baffled channel", AIAA J. Thermophys. Heat Transfer, vol. (11), pp. 429-436.
- Idelcik, I. E. (traduzido do Russo por Meury, M.), 1960, "Memento des Pertes de Charge", editeur Paris.
- Kelkar, K. M., Patankar, S. V., 1987, "Numerical Prediction of Flow and Heat Transfer in a Parallel Plate Channel With Staggered Fins", Journal of Heat Transfer, Vol. 109, pp. 25-30.

- Lopez, J. R., Anand, N. K., Fletcher, L. S., 1996, "Heat Transfer in a Three-Dimensional Channel With Baffles", Numerical Heat Transfer, Part A, Vol. 30, pp. 189-205.
- Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Mc-Graw Hill.
- Pedras, M.H.J., de Lemos, M.J.S., 2000, "On the Definition of Turbulent Kinetic Energy for Flow in Porous Media", Int. Comm. In Heat & Mass Transfer, vol. 27 (2), pp. 211-220.
- Pedras, M. H. J., de Lemos, M.J.S., 2001, "Macroscopic Turbulence Modeling for Incompressible Flow Through Undeformable Porous Media", Intern. J. Heat and Mass Transfer, vol. 44 (6), pp. 1081-1093.
- Rocamora Jr, F.D., de Lemos, M.J.S., 2001, Heat Transport Modeling for Laminar and Turbulent Flows in Porous Media, Proc. of COBEM2001 - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia, MG, Brasil.
- Rocamora Jr., F.D., 2001, "Transporte de Calor em Regime Turbulento em Meio Poroso Descontínuo", Tese de Doutorado, ITA.
- Rowley, G.J., Patankar, S.V., 1983, "Analysis of Laminar Flow and Heat Transfer in Tubes with Internal Circumferential Fins", Intern. J. Heat and Mass Transfer, vol. 27 (4), pp. 553-560
- Silva, R.A., de Lemos, M.J.S., 2003, "Numerical Analysis of the Stress Jump Interface Condition For Laminar Flow Over a Porous Layer", Numerical Heat Transfer, Part A, 43: 603-617.
- Silva, R.A., de Lemos, M.J.S., 2002, "Escoamento Turbulento em um Canal Contendo Obstáculo Poroso Impondo uma Condição de Periodicidade Espacial", Escola de Primavera Transição & Turbulência, em CD-ROM.
- Santos, N.B., de Lemos, 2004, "Transferência de Calor em Canais Contendo Obstruções Porosas", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, em CD-ROM (aceito).
- Yang, Y., Hwang, C., 2003, "Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-baffled channel", Intern. J. Heat and Mass Transfer, vol. 46, pp. 771-780.

EFFECT OF POROSITY AND PERMEABILITY IN HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN CHANNEL WITH POROUS BAFFLES

Nicolau B. Santos¹

Marcelo J.S. De Lemos²

Departamento de Energia-IEME

Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA

12228-900-São José dos Campos-SP-Brazil

¹nicolau@mec.ita.br; ²delemos@mec.ita.br

Abstract: *The present paper investigates the influence caused by the addition of porous baffles, with different permeability and porosity, in fluid flow and heat transfer inside a channel between parallel plates. It was observed that for the flow conditions here studied, there seems to be no heat transfer enhancement when the porous baffles are used. Moreover, the Nusselt number and friction factor were influenced by permeability. On the other hand, the porosity did not cause considerable variation on f and Nu .*

Keywords: *laminar flow, porous media, numerical solution, heat transfer*