

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM CANAIS CONTENDO OBSTRUÇÕES POROSAS.

Nicolau B. Santos¹

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

Departamento de Energia - IEME

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

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

E-mail: ¹nicolau@mec.ita.br, ²delemos@mec.ita.br

* Corresponding author

Resumo. *O presente trabalho visa avaliar a influência na transferência de calor e no escoamento desenvolvido, em um canal formado por placas paralelas, devido à inserção de chicanas sólidas ou porosas. Para o caso proposto, escoamentos laminares bidimensionais foram avaliados numericamente. O meio poroso foi modelado conforme proposto pelo trabalho de Pedras e de Lemos (2000, 2001). O perfil de velocidades e as linhas de corrente foram analisados, indicando uma diminuição na região de recirculação na presença de obstruções porosas quando comparadas às sólidas. Para as chicanas porosas analisadas neste trabalho, verificou-se que não houve um ganho efetivo na relação de transferência de calor por potência de bomba.*

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 Figura 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.

Para este artigo, foi realizada uma análise numérica do escoamento com transferência de calor em um canal contendo 16 obstruções, sendo essas sólidas ou porosas ($K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$). 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 de 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.

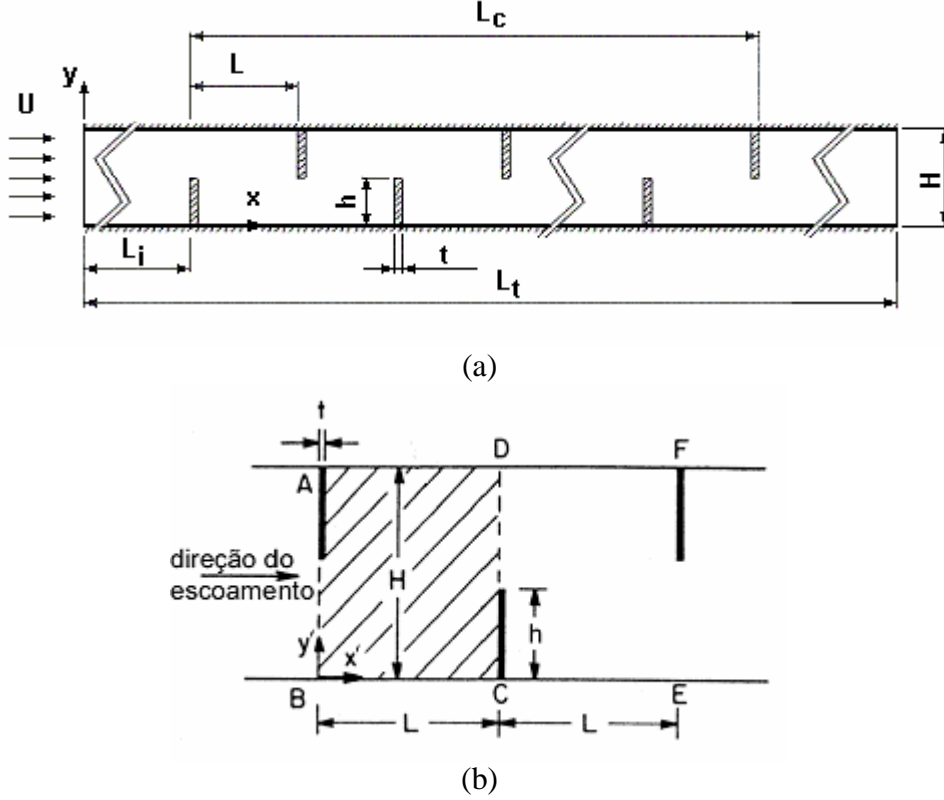


Figura 1. Modelo computacional: a) domínio de cálculo, b) célula de um canal com chicanas.

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:

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

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

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

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, \mathbf{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, 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 numérica 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. CÁLCULO DO FATOR DE ATRITO

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

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

onde ΔP representa a queda de pressão, \bar{U} é a velocidade média e \mathbf{r} 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 $\text{Re} = \frac{\mathbf{r} \bar{U} D_h}{\mathbf{m}}$, onde D_h é o diâmetro hidráulico.

2.2. CÁLCULO DO NÚMERO DE NUSSELT

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:

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

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

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

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

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.

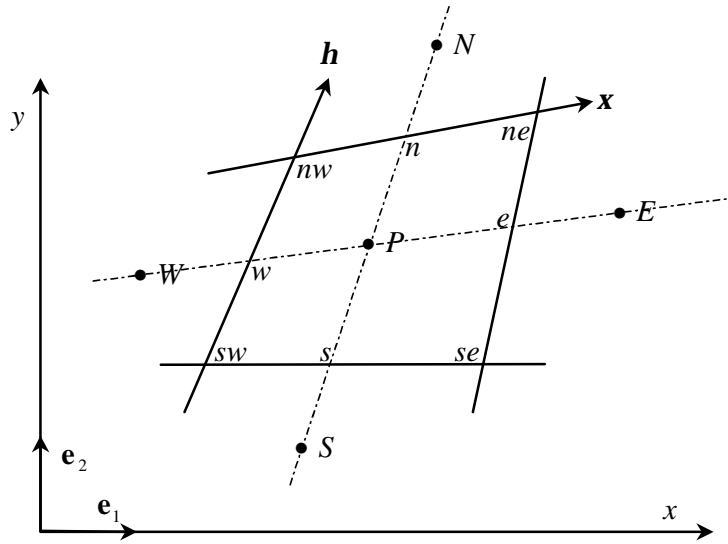


Figura 2. Volume de controle e sua discretização nas coordenadas generalizadas.

A Figura 2) apresenta um volume de controle típico juntamente com o sistema de coordenadas generalizadas, $h - x$. A forma geral e discretizada da equação de conservação bidimensional de uma propriedade genérica 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 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 $\langle j \rangle^i$, este será linearizado da seguinte forma:

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

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

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

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

Os resultados foram convergidos até que o resíduo fosse menor que 10^{-6} . Validou-se o código através do cálculo de número de Nusselt e do fator de atrito para um canal limpo, i.e. sem obstruções, $\overline{Nu}_0 = 7,54$ e fator de atrito $(f Re)_0 = 96$, onde se obteve um desvio máximo de 0,7%.

A primeira etapa do trabalho foi a verificação da independência da malha. Para isso, tomou-se como referência as características do domínio de cálculo apresentado na Figura 1). Foram utilizados cinco malhas para o domínio de cálculo (1507x80, 1507x120, 1507x200, 1507x300 e 2112x300), sendo os pontos igualmente espaçados na região livre, e concentrados na região da obstrução de forma a obter 5 nodos sobre esta. As malhas de 1507x(80-300) tem 80x(80-300) volumes de controle entre duas obstruções, enquanto que a malha de 2112x300 tem 120x300 volumes de controle. Verificou-se que o desvio entre a malha de 1507x200 e a de 1507x300 foi inferior a 0,2%. Porém a diferença em relação à malha de 2112x300 ficou em torno de 3,9%. Devido ao elevado tempo computacional gasto na malha 2212x300 (72 horas), se optou pela malha de 1507x200, a qual pode ser considerada praticamente independente.

Um ponto de grande interesse refere-se a verificação de onde o escoamento poderia ser considerado como espacialmente periódico. Primeiramente foi analisado o comportamento dos perfis de velocidade sobre as obstruções, como apresentado na Figura 3). Constatou-se que, a partir da sétima obstrução, os perfis de velocidade permaneceram praticamente inalterados. Numa segunda etapa, procurou-se avaliar os parâmetros adimensionais característicos e observou-se que, na região entre a sétima e a décima quinta obstrução, os valores de $\overline{Nu} / \overline{Nu}_0$ e $f Re / (f Re)_0$ se mantiveram constantes, como mostra a Figura 5).

Os mesmos procedimentos foram empregados para as obstruções porosas. Cabe observar que as propriedades aqui escolhidas para o material poroso fazem com que este se comporte de forma semelhante a um material sólido. Essa característica pode ser observada nos perfis de velocidade apresentados na Figura 4). Os resultados para os parâmetros adimensionais se mostraram semelhantes aos anteriores, como indicado na Figura 6). Com esses dados foi constatado que, a partir da sétima obstrução, o escoamento pode ser considerado como espacialmente periódico, concordando com as visualizações de Berner, *et. al.* (1984).

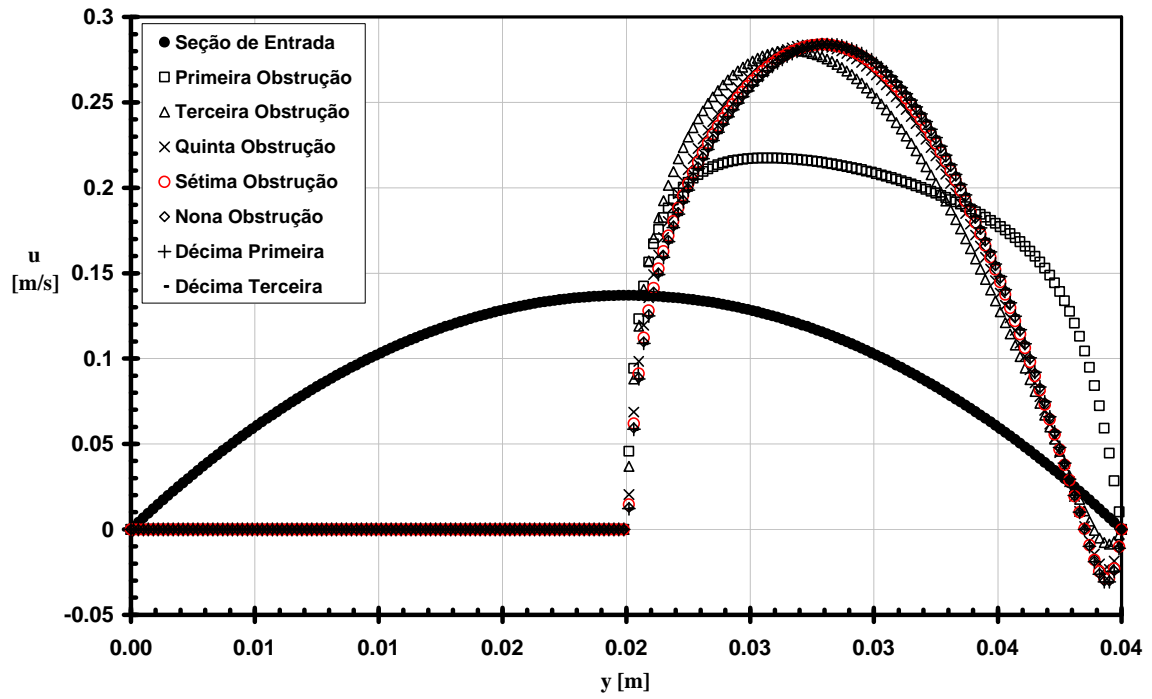


Figura 3. Perfis de velocidade sobre as obstruções sólidas para $Re = 500$, $h/H = 0,5$.

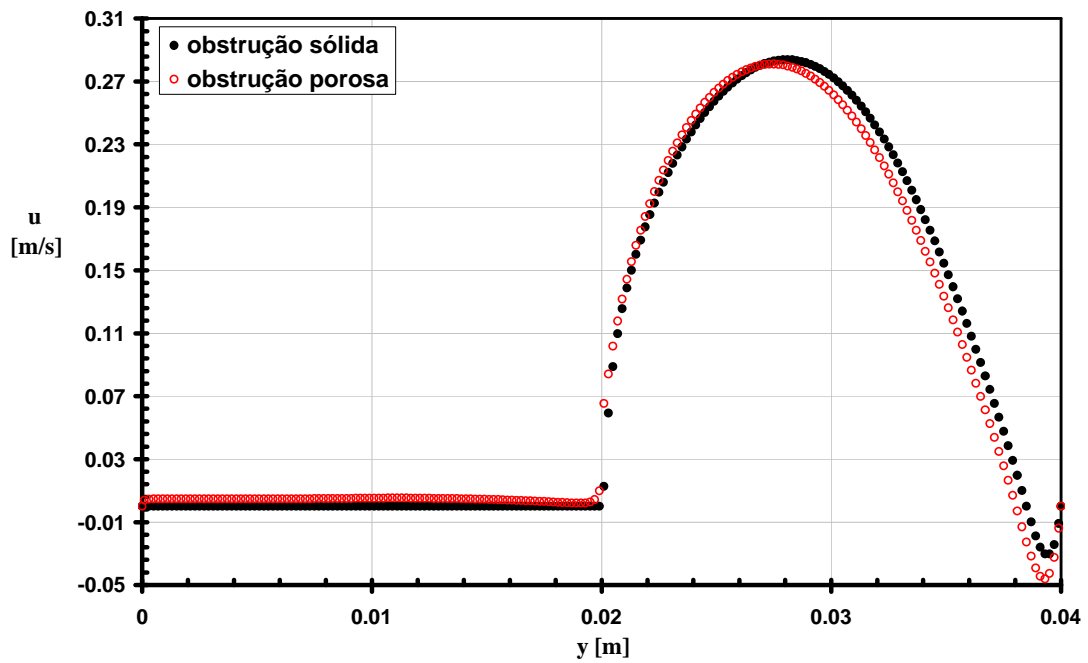


Figura 4. Comparação do perfil de velocidades sobre a 9ª obstrução com $Re = 500$, $h/H = 0,5$, para obstrução sólida e porosa $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$.

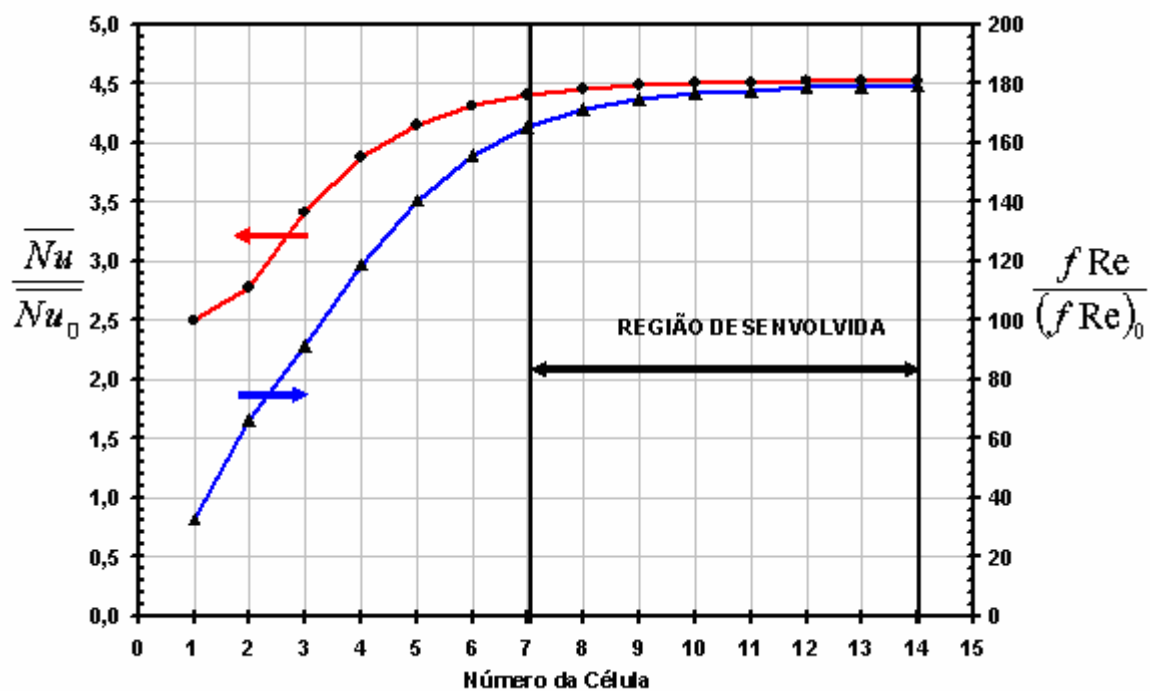


Figura 5. Apresentação da região na qual se pode considerar o escoamento como espacialmente periódico, para $Re = 500$, $h/H = 0,5$ e com obstruções sólidas.

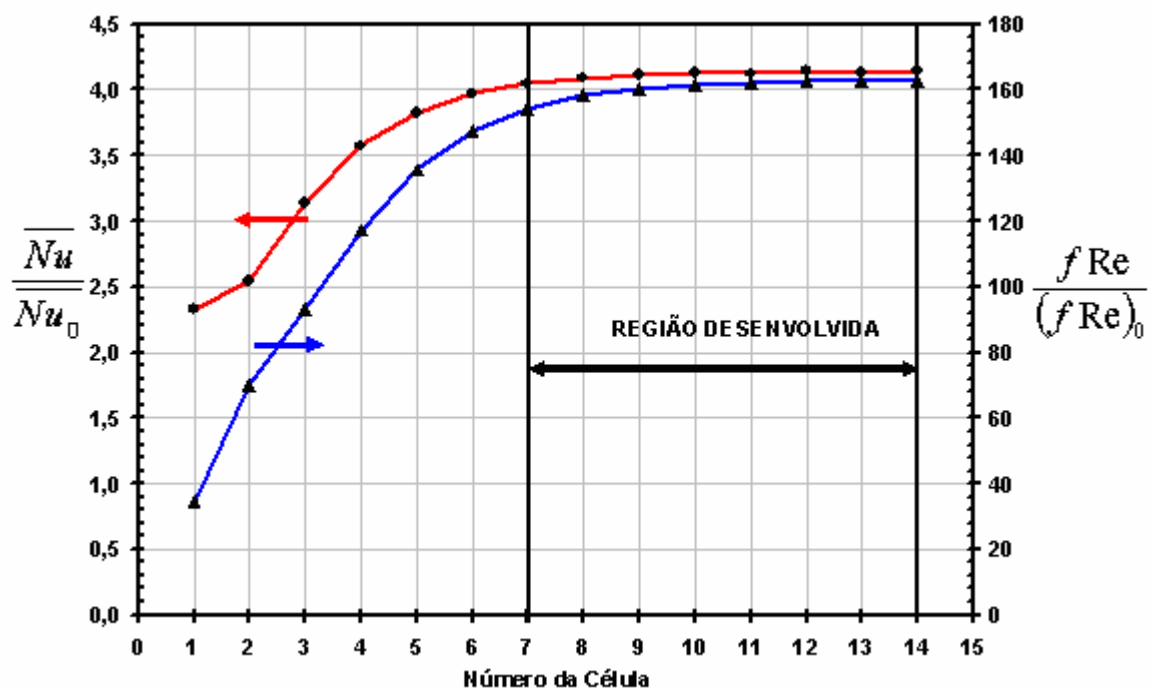


Figura 6. Apresentação da região na qual se pode considerar o escoamento como espacialmente periódico para $Re = 500$, $h/H = 0,5$ e com obstrução porosa, $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$.

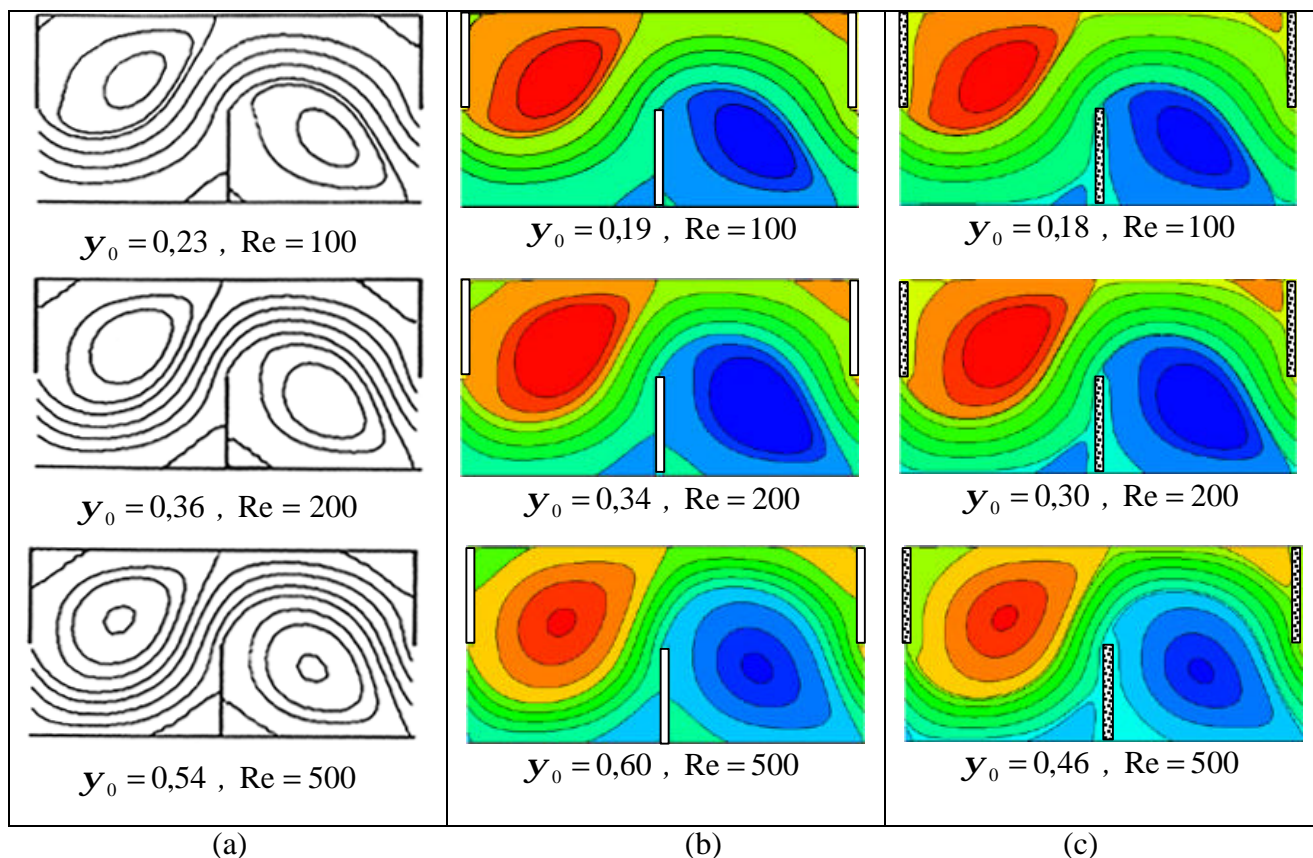


Figura 7. Linhas de corrente. (a) Kelkar & Patankar (1987), (b) obstrução sólida, (c) obstrução porosa $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$.

A Figura 7) apresenta uma comparação qualitativa entre as linhas de corrente obtidas no presente trabalho e as apresentadas por Kelkar & Patankar (1987). Pode-se verificar que o comportamento no caso sólido Figura 7a) e (7b) é bastante semelhante aos resultados da literatura, apresentando um aumento das recirculações com o aumento do número de Re . A Figura 7c) mostra o comportamento das linhas de corrente para o caso de aletas porosas. O resultado obtido concorda com o esperado, havendo uma pequena diminuição das recirculações, tendo em vista que o meio poroso utilizado aproxima-se bastante do meio sólido. Na Figura 7), y_0 representa a relação entre a vazão mássica na maior bolha de recirculação e na região de escoamento livre. De posse desse parâmetro é possível fazer comparações quantitativas com os resultados apresentados por Kelkar & Patankar (1987).

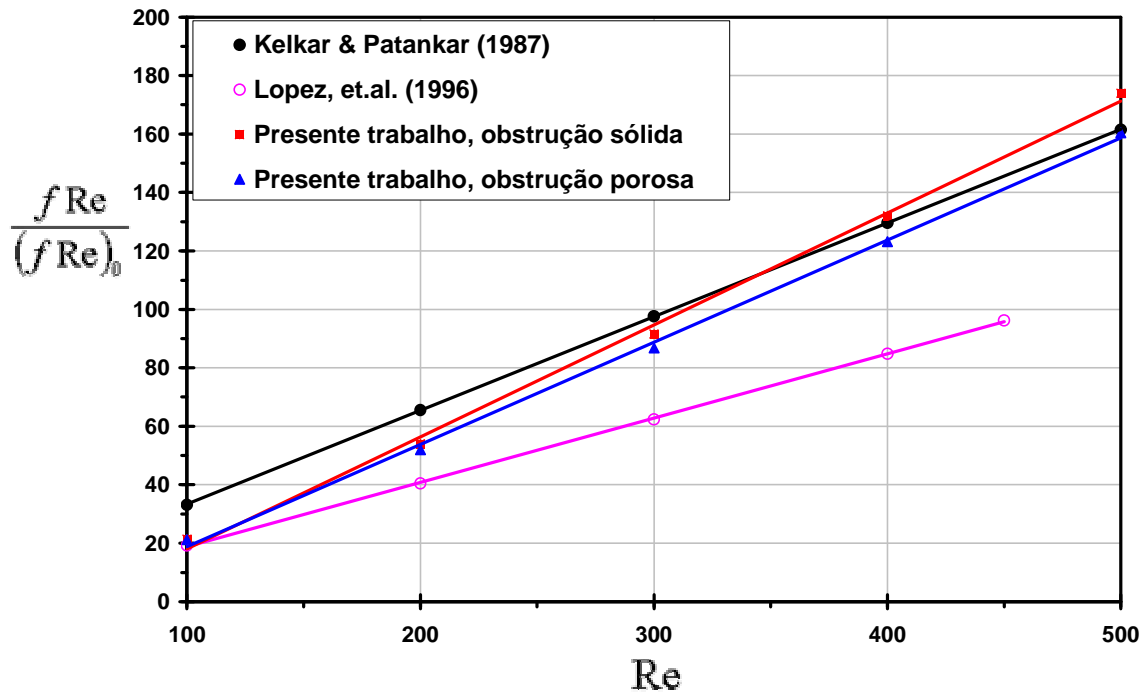


Figura 8. Incremento da perda de carga de um canal obstruído em relação a um canal limpo para vários números de Reynolds. Comparação entre os resultados presentes para obstrução sólida e porosa $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$, Kelkar & Patankar (1987) e Lopez, *et. al* (1996).

Das Figura 8) e (9) pode-se verificar que as diferenças de comportamento entre as obstruções sólidas e porosas se intensificam com o número de Reynolds. Também se nota uma razoável concordância com a literatura. Para uma análise efetiva da influência do tipo de obstrução (sólido ou poroso), se faz necessário comparar o decréscimo na perda de carga quando se usa um meio poroso com a redução que este provoca na transferência de calor. Essa análise pode ser feita através da relação de performance da transferência de calor $\overline{Nu}^* = \overline{Nu} / (f / f_0)^{1/3}$. Dessa relação, verifica-se que para o canal com chicanas sólidas há um ganho maior do que um canal com chicanas porosas, como apresenta a Tabela 1).

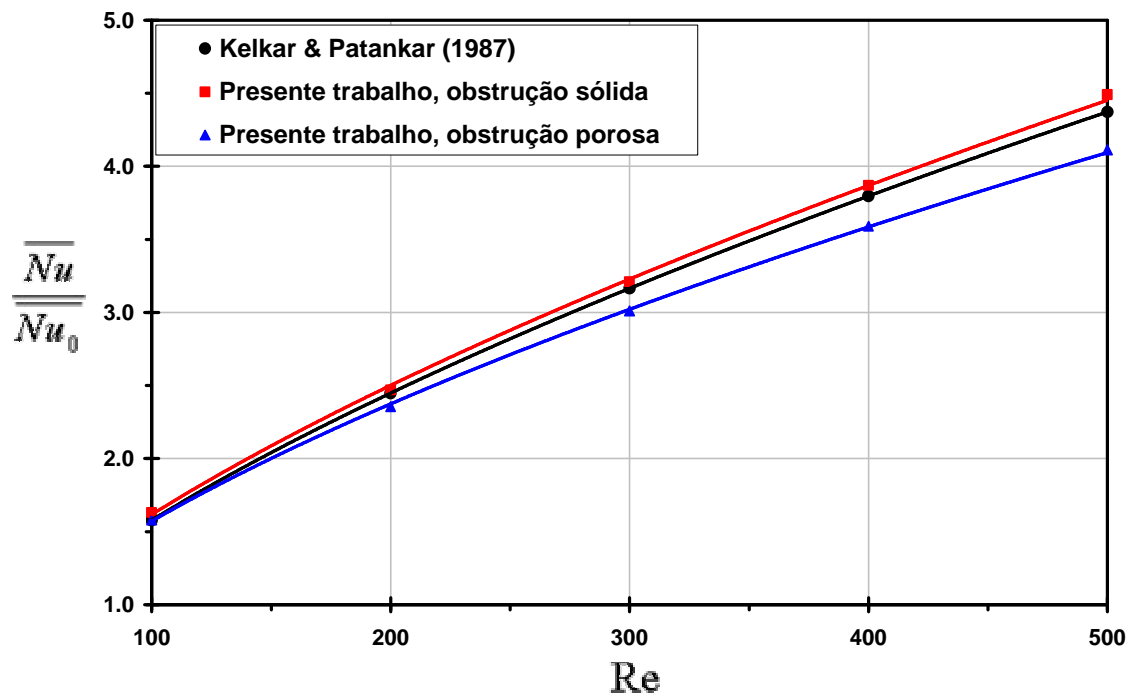


Figura 9 Incremento na transferência de calor de um canal obstruído com relação a um canal limpo para diversos números de Reynolds. Comparação entre os resultados presentes para obstrução sólida e porosa $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$, e Kelkar & Patankar (1987).

Tabela 1. Aumento efetivo da transferência de calor em um canal de placas paralelas com obstrução sólida e porosa $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$ e $f = 0,40$, quando comparado com um canal sem obstruções (limpo).

$Nu^* = Nu / (f / f_0)^{1/3}$			
Re	obstrução sólida	obstrução porosa	Desvio
100	443%	431%	-3%
200	493%	476%	-3%
300	537%	513%	-4%
400	573%	544%	-5%
500	606%	571%	-6%

5. CONCLUSÕES

Verificou-se que, para um canal com chicanas sólidas ou porosas, o escoamento e os campos de temperatura podem ser considerados espacialmente periódicos a partir da sétima obstrução.

Para um canal com chicanas porosas de permeabilidade $K = 1,0 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2$, porosidade $f = 0,40$, $k/k_f = 10$ e $Pr = 0,7$, tem-se uma perda de performance, menor que 6%, comparada aos resultados obtidos com chicanas sólidas. Para trabalhos futuros pretende-se verificar a influência da permeabilidade, da porosidade e da relação de condutividade, procurando verificar em quais regiões existem vantagens na substituição de uma chicana sólida por uma porosa.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. 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.
- 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.
- Idelcik, I. E. (traduzido do Russo por Meury, M.), 1960, "Memento des Pertes de Charge", editeur Paris.
- 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.
- 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.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

LAMINAR FLOW AND HEAT TRANSFER ANALYSIS IN A CHANNEL WITH POROUS BAFFLES

Nicolau B. Santos
Marcelo J.S. De-Lemos
Departamento de Energia-IEME
Instituto Tecnológico de Aeronáutica-ITA
12228-900-São José dos Campos-SP-Brasil
e-mail: delemos@mec.ita.br

Abstract. *The present paper investigates the influence caused by the addition of porous and solid baffles in fluid flow and heat transfer inside a channel between parallel plates. In the proposed case, laminar, bi-dimensional and homogeneous flow was numerically evaluated. Porous media was modeled as described in the work of Pedras and de Lemos (2000-2001). Velocity profiles and streamlines were compared, showing a decrease in recirculation flow when a porous baffles were used. It was verified that this porous baffles does not increase the heat transfer performance ratio.*

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