

ESCOAMENTO TURBULENTO EM REGIÃO ESPACIALMENTE PERIÓDICA EM CANAL CONTENDO OBSTRUÇÃO POROSA

Luzia A. Tofaneli¹

Marcelo J.S. De-Lemos²

Departamento de Energia – IEME

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

12228-900 – São José dos Campos – S.P. - Brasil

¹e-mail: ltofa@mec.ita.br, ²e-mail: delemos@mec.ita.br

Resumo. Os escoamentos em canais contendo obstáculo poroso são de interesse em várias áreas da ciência e engenharia tais como, hidrologia, reservatórios de petróleo, reatores químicos, etc. Neste trabalho são apresentadas soluções numéricas para o escoamento em um canal aletado com material poroso. A condição de periodicidade espacial ao longo do canal é empregada. As equações do movimento e continuidade de massa são integradas em um volume elementar representativo acarretando em um único conjunto de equações governantes válido para todo o domínio computacional. Estas equações são discretizadas pelo método de volume de controle e o sistema de equações resultante é resolvido pelo método SIMPLE. A condição de salto na tensão de cisalhamento é considerada na interface. São apresentados resultados para o campo de velocidade em função do número de Reynolds, da porosidade e permeabilidade das aletas porosas.

Palavras chave: meios porosos, solução numérica, turbulência

1. Introdução

Em função da ampla aplicação envolvendo o escoamento de fluidos em canal contendo obstáculo poroso, em diversos setores da indústria e da ciência, observou-se, nas últimas décadas, um crescente interesse de vários pesquisadores em simular este tipo de escoamento. Sistemas de engenharia aplicados à prospecção de petróleo, dispositivos de filtragem, escoamento sobre florestas e plantações e resfriamento de componentes eletrônicos são alguns exemplos de escoamentos nos quais a fase líquida permeia através de uma estrutura porosa.

Rocamora & de-Lemos (2000a) (2000b) apresentaram soluções numéricas para escoamento laminar em meios híbridos (limpo/poroso). Estes trabalhos não consideraram o salto da tensão cisalhante entre o meio limpo e o meio poroso. Na literatura, para escoamento laminar, Ochoa-Tapia & Whitaker (1995a), (1995b) propuseram um coeficiente ajustável de salto da tensão cisalhante na interface. Kuznetsov (1996), (1997) e (1999) apresentou soluções analíticas considerando tal salto em canais parcialmente preenchido com material poroso. Recentemente, Silva & de-Lemos (2002) apresentaram soluções numéricas, também para escoamento laminar, num meio híbrido (limpo/poroso) levando em conta o salto da tensão cisalhante na interface. Para escoamento turbulento em estruturas porosas, de-Lemos & Pedras (2000a), (2000b) e (2001) desenvolveram um modelo macroscópico de turbulência de duas equações.

Recentemente, o escoamento laminar em canais aletados com material poroso foi investigado por Tofaneli & de-Lemos (2002a) onde os efeitos do número de Reynolds e do salto da tensão cisalhante foram abordados. Lá, foi feito uso da metodologia numérica desenvolvida em Silva & de-Lemos (2002). Posteriormente, Tofaneli & de-Lemos (2002b) também investigaram a influência da porosidade e da permeabilidade das aletas porosas no padrão do escoamento no canal.

O objetivo deste trabalho é estender os resultados de Tofaneli & de-Lemos (2002a), (2002b) considerando agora escoamento turbulento. cidade e pressão em função do número de Reynolds, da porosidade e permeabilidade das aletas porosas. Aqui, o modelo de de-Lemos & Pedras (2000a) (2000b) (2001) é empregado.

2. Modelagem Matemática

Nesta seção são apresentados a geometria investigada e o modelo matemático empregado. A Figura 1 ilustra a geometria analisada onde H é a distância entre as paredes, L comprimento do canal, l e h a espessura e altura da aleta, respectivamente. A condição de periodicidade espacial é usada ao longo da coordenada longitudinal x , buscando-se, assim, a representação de um canal infinitamente longo onde aletas porosas igualmente espaçadas são engastadas em uma das paredes.

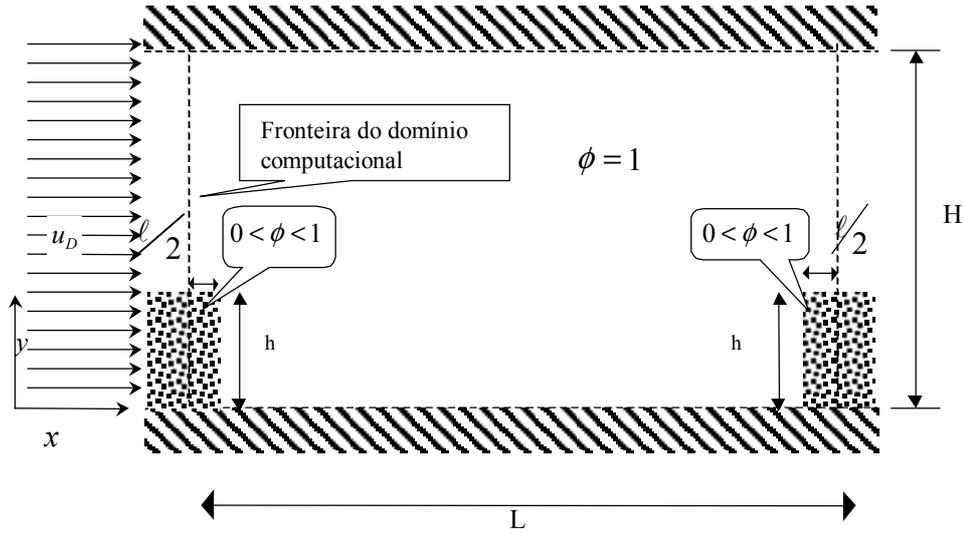


Figura 1 Geometria analisada: Canal aletado e célula periódica.

As equações macroscópicas que governam o escoamento do fluido foram apresentadas em de-Lemos & Pedras (2000a) (2000b) (2001) e são da forma:

Equação da continuidade:

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

Equação de quantidade de movimento:

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_D}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{\bar{u}_D \bar{u}_D}{\phi} \right) \right] = -\nabla (\phi \langle p \rangle^i) + \mu \nabla^2 \bar{u}_D + \nabla \cdot \left(-\rho \phi \langle \bar{u}' u' \rangle^i \right) + \phi \rho g - \left[\frac{\mu \phi}{K} \bar{u}_D + \frac{c_F \phi \rho}{\sqrt{K}} |\bar{u}_D| \bar{u}_D \right] \quad (2)$$

onde \bar{u}_D é a média temporal da velocidade de Darcy e o tensor de Reynolds macroscópico é dado por:

$$-\rho \phi \langle \bar{u}' u' \rangle^i = \mu_{t_\phi} 2 \langle \bar{D} \rangle^v - \frac{2}{3} \phi \rho \langle k \rangle^i I \quad (3)$$

Na eqn. (3) o tensor taxa de deformação é dado por:

$$\langle \bar{D} \rangle^v = \frac{1}{2} \left[\nabla (\phi \langle \bar{u} \rangle^i) + \left[\nabla \phi \langle \bar{u} \rangle^i \right]^T \right] \quad (4)$$

Neste trabalho, μ_{t_ϕ} é a viscosidade turbulenta macroscópica dada por,

$$\mu_{t_\phi} = \rho c_\mu \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \quad (5)$$

A equação macroscópica para a energia cinética de turbulência $\langle k \rangle^i$ pode ser escrita como,

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (\phi \langle k \rangle^i) + \nabla \cdot (\bar{u}_D \langle k \rangle^i) \right] = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t_\phi}}{\sigma_k} \right) \nabla (\phi \langle k \rangle^i) \right] - \rho \langle \bar{u}' u' \rangle^i : \nabla \bar{u}_D + c_k \rho \frac{\phi k_\phi |\bar{u}_D|}{\sqrt{K}} - \rho \phi \langle \varepsilon \rangle^i \quad (6)$$

onde c_k e σ_k são constantes adimensionais. Para a taxa macroscópica de dissipação de energia cinética turbulenta, tem-se,

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} (\phi \langle \varepsilon \rangle^i) + \nabla \cdot (\bar{u}_D \langle \varepsilon \rangle^i) \right] = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_{t_\phi}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla (\phi \langle \varepsilon \rangle^i) \right] + c_1 \left(-\rho \langle \bar{u} \bar{u} \rangle^i : \nabla \bar{u}_D \right) \frac{\langle \varepsilon \rangle^i}{\langle k \rangle^i} + c_2 c_k \rho \frac{\phi \varepsilon_\phi |\bar{u}_D|}{\sqrt{K}} - c_2 \rho \phi \frac{\langle \varepsilon \rangle^{i2}}{\langle k \rangle^i} \quad (7)$$

onde c_1 , c_2 e σ_ε são constantes. Aqui, $\langle \varepsilon \rangle^i$ representa a média intrínseca da taxa de dissipação de energia cinética de turbulência.

2.1. Condições de interface e de contorno

A equação que descreve o salto da tensão cisalhante na interface entre o meio limpo e o meio poroso, proposta por Ochoa-Tapia & Whitaker (1995a), (1995b) é dada por:

$$\mu_{ef} \frac{\partial u_{D_\xi}}{\partial \eta} \Big|_{\phi \neq 1} - \mu \frac{\partial u_{D_\xi}}{\partial \eta} \Big|_{\phi=1} = \beta \frac{\mu}{\sqrt{K}} u_{D_\xi} \Big|_{interface} \quad (8)$$

onde u_{D_ξ} é o componente da velocidade de Darcy paralela à interface alinhada com a direção normal ξ e normal à direção η , sendo (ξ, η) um sistema de coordenadas generalizadas. Na equação acima, μ_{ef} é a viscosidade efetiva para a região porosa, μ é a viscosidade dinâmica do fluido, K é a permeabilidade do meio poroso e β um coeficiente adimensional ajustável na representação do salto da tensão cisalhamento na interface.

Para a solução numérica das equações são utilizadas as condições de continuidade da velocidade macroscópica, da pressão intrínseca, da energia cinética de turbulência e sua taxa de dissipação assim como de seus respectivos fluxos difusivos, da forma,

$$\bar{u}_D \Big|_{\phi \neq 1} = \bar{u}_D \Big|_{\phi=1} \quad (9)$$

$$\langle \bar{p} \rangle^i \Big|_{\phi \neq 1} = \langle \bar{p} \rangle^i \Big|_{\phi=1} \quad (10)$$

$$\langle \bar{k} \rangle^V \Big|_{\phi \neq 1} = \langle \bar{k} \rangle^V \Big|_{\phi=1} \quad (11)$$

$$\left(\mu + \frac{\mu_{t_\phi}}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle^V}{\partial y} \Big|_{\phi \neq 1} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \langle k \rangle^V}{\partial y} \Big|_{\phi=1} \quad (12)$$

$$\langle \bar{\varepsilon} \rangle^V \Big|_{\phi \neq 1} = \langle \bar{\varepsilon} \rangle^V \Big|_{\phi=1} \quad (13)$$

$$\left(\mu + \frac{\mu_{t_\phi}}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle^V}{\partial y} \Big|_{\phi \neq 1} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \langle \varepsilon \rangle^V}{\partial y} \Big|_{\phi=1} \quad (14)$$

$$\left(\mu_{ef} + \mu_{t_\phi} \right) \frac{\partial \bar{u}_{D_p}}{\partial y} \Big|_{\phi \neq 1} - \left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial \bar{u}_{D_p}}{\partial y} \Big|_{\phi=1} = \left(\mu + \mu_t \right) \frac{\beta}{\sqrt{K}} \bar{u}_{D_i} \Big|_{interface} \quad (15)$$

As condições de interface (9) e (10) foram apresentadas por Ochoa-Tapia & Whitaker (1995a). Lee & Howell, (1987) propuseram as equações (11) a (14), assumindo continuidade de k e ε . A equação (15) é uma extensão da proposta de Ochoa-Tapia & Whitaker (1995a) para o caso de regime turbulento.

O domínio computacional mostrado na Figura 1, de comprimento L e altura H , corresponde a uma célula espacialmente periódica ao longo da coordenada x . Neste trabalho, a condição de periodicidade espacial foi aplicada ao longo desta coordenada. Os valores inicialmente impostos na entrada em $x=0$ eram subsequentemente substituídos pelos valores na saída, em $x=L$, num processo repetitivo até que ambas as posições, no início e no fim da célula periódica, apresentassem idênticos perfis para todas as variáveis do problema.

2.2. Método Numérico

As Equações (1) e (2) sujeitas às condições de contorno e de interface (9)-(15), foram discretizadas para um domínio bidimensional em coordenadas generalizadas, envolvendo ambos os meios limpo e poroso. A discretização das equações usa um sistema de coordenadas generalizadas para uma gama de aplicações ainda maior. O método de volumes finitos foi empregado nesta discretização e, para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade, o algoritmo SIMPLE de Patankar (1980) foi utilizado. A Figura 2 apresenta um volume de controle típico juntamente com o sistema de coordenadas generalizadas, $\eta-\xi$, sobre o qual as equações de transporte foram discretizadas. Detalhes das implementações numéricas podem ser vistos em Pedras & de-Lemos (2001) e Silva & de-Lemos (2002).

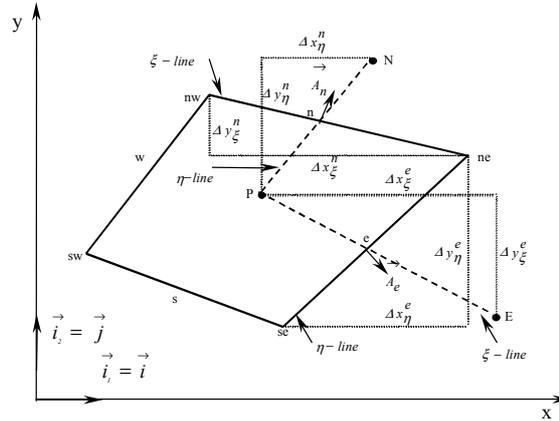


Figura 2: Volume de controle e notação.

3. Resultados e discussões

Como um teste inicial, a Figura 3 mostra o efeito do número de Reynolds para o caso particular de aletas impermeáveis (sólido). Nota-se que, conforme o esperado, com o aumento do número de Reynolds há um aumento na vazão mássica através da passagem entra a superfície superior e o topo da aleta.

A Figura 4 mostra o efeito da permeabilidade do material da aleta no perfil de velocidade média para $Re_H = 10^5$ onde Re_H é o número de Reynolds baseado na altura H do canal. Nota-se que para maiores valores da permeabilidade K , o fluido permeia com maior facilidade através do material poroso. Tendo em vista que a vazão mássica através do canal é a mesma para todas as curvas, o incremento da velocidade pela aleta porosa reduz a vazão mássica pela região desobstruída de espessura $H-h$. O efeito da porosidade do material da aleta na velocidade \bar{u}_D para $Re_H = 32000$ é mostrado na Figura 5. Embora não se tenha variado substancialmente a porosidade, observa-se que para uma permeabilidade baixa ($K = 2 \times 10^{-7} \text{ m}^2$) não há uma influência apreciável do valor da porosidade no padrão do escoamento.

Na Figura 6 o efeito da condição de salto no perfil de velocidade na saída do canal, com $Re_H = 30.000$. Nota-se que há uma influência do valor do coeficiente de salto da tensão de cisalhamento no perfil de velocidades. Para valores positivos de β , o perfil torna-se mais achatado na região porosa e mais variável no meio limpo. Com isto, o valor máximo da velocidade é aumentado. Para valores negativos de β , o perfil na região da interface torna-se mais suave e o valor da velocidade máxima é reduzido. As implicações mais importantes decorrentes da deformação do perfil de velocidade estão associadas às variações nas taxas de produção de energia cinética de turbulência. Perfis com gradientes mais acentuados no meio limpo acarretam em taxas de produção de k maiores, refletindo um maior percentual de energia mecânica que é convertido em energia cinética de turbulência.

Finalmente, a Figura 7 apresenta gráficos para o padrão do escoamento em todo o domínio de cálculo para aletas de espessuras diferentes. Na figura são mostrados casos para diferentes permeabilidades. Embora a faixa de K utilizada não tenha sido extensa, nota-se que quanto menor a permeabilidade maior a região de recirculação após o obstáculo poroso. Também é observado que quanto maior a espessura do obstáculo poroso, maior é a região de recirculação, uma vez que, com o aumento de l , o tamanho da região desobstruída entre aletas vizinhas é reduzido.

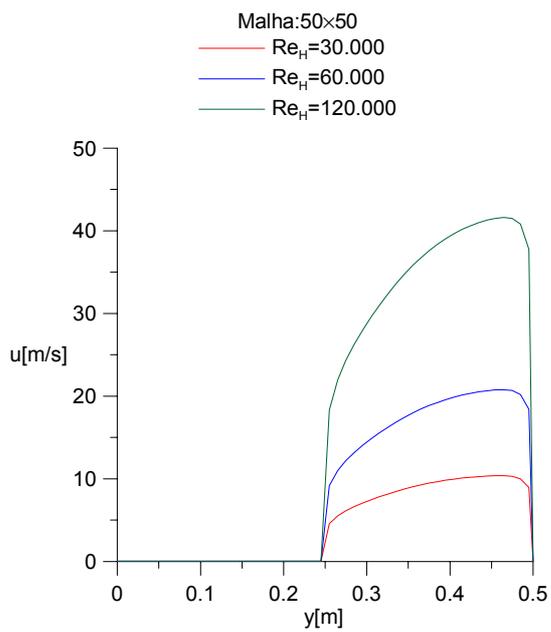


Figura 3: Efeito do número de Reynolds no campo de velocidade na saída do canal. Aleta sólida

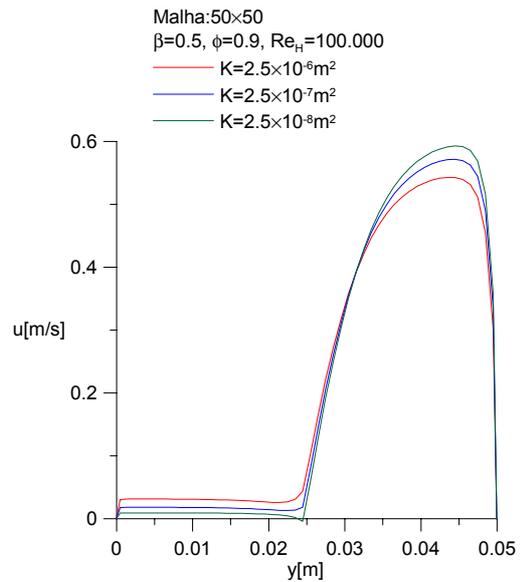


Figura 4: Efeito da permeabilidade no campo de velocidade na saída do canal, $\phi = 0.9$.

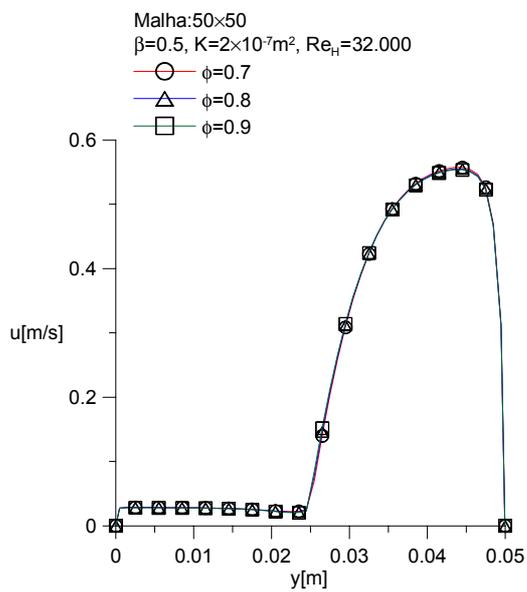


Figura 5: Efeito da porosidade no campo de velocidade na saída do canal, $K = 2 \times 10^{-7} m^2$.

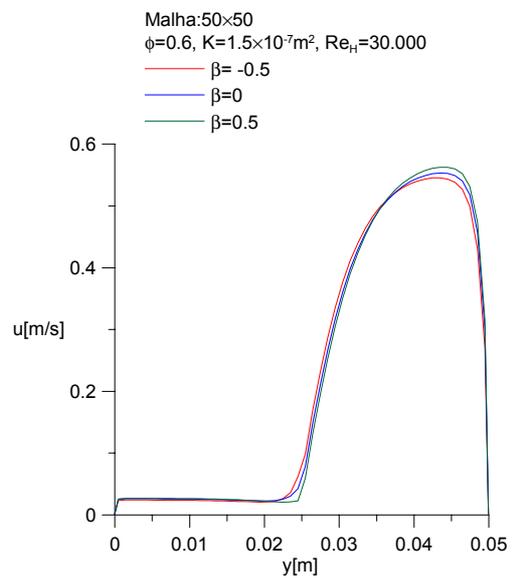
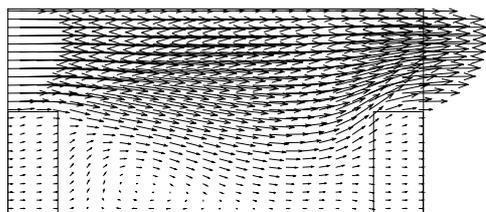


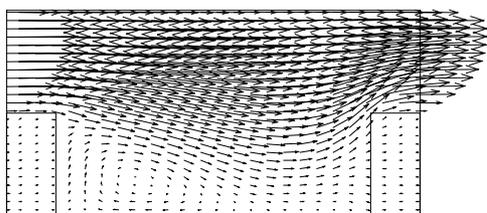
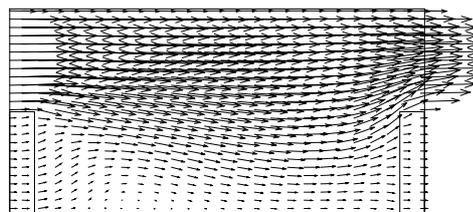
Figura 6: Efeito da condição de salto no perfil de velocidade na saída do canal, $Re_H = 30000$.

$$l/h = \frac{0.012}{0.025}$$

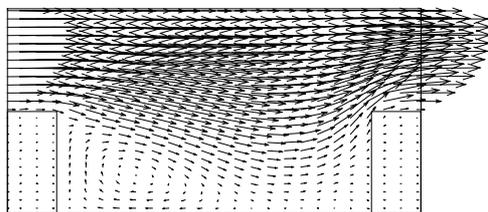
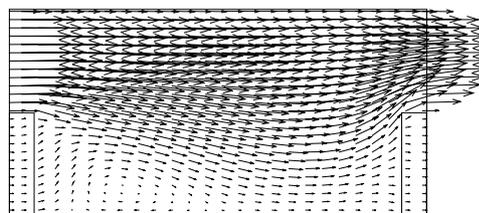
$$l/h = \frac{0.006}{0.025}$$



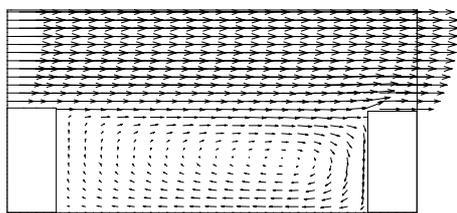
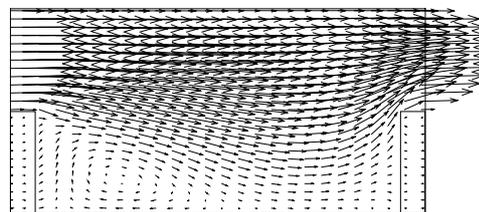
a)



b)



c)



d)

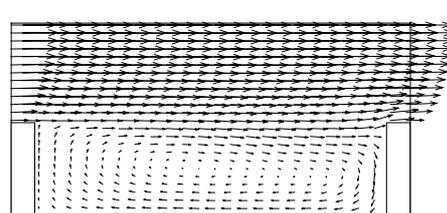


Figura 7: Efeito da permeabilidade K e da espessura da aleta l no campo de velocidades, $\phi = 0.9$, $Re_H = 100.000$:

a) $K = 2.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, b) $K = 2.5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, c) $K = 2.5 \times 10^{-8} \text{ m}^2$, d) sólido

4. Conclusões

Este trabalho apresentou resultados para a solução numérica do escoamento turbulento em um canal contendo obstrução porosa. Foram considerados os efeitos da permeabilidade e da porosidade do material das aletas. Foi também considerada a condição de salto na tensão de cisalhamento na interface. A discretização das equações governantes utilizou o método de volumes finitos e o conjunto de equações algébricas foi resolvido pelo método SIMPLE. Os resultados indicaram que o efeito da condição de salto nas características do escoamento tem a influência nos perfis de velocidade, acarretando, em última análise, na modificação dos valores de k dentro do canal.

5. Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq pelo suporte financeiro durante a preparação deste trabalho.

6. Referências

- de-Lemos, M. J. S., Pedras, M. H. J., 2000a, "Modeling Turbulence Phenomena in Incompressible Flow Through Saturated Porous Media", Proc. of 34th ASME-National Transfer Conference (on CD-ROM), ASME-HTD-1463CD, Paper NHTC2000-12120, ISBN:0-7918-1997-3, Pittsburgh, Pennsylvania, August 20-22.
- de-Lemos, M. J. S., Pedras, M. H. J., 2000b, "Simulation of Turbulent Flow Through Hybrid Porous Medium Clear Fluid Domains", Proc. of IMECE2000-ASME-Intern. Mech. Eng. Congr., ASME-HTD-366-5, pp. 113-122, ISBN:0-7918-1908-6, Orlando Florida, November 5-10.
- de-Lemos, M. J. S., Pedras, M. H. J., 2001, "Recent Mathematical Models For Turbulent Flow In Saturated Rigid Porous Media", Journal of Fluids Engineering, vol. 123, n.4 (in press).
- 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 with a Porous Medium". Applied Scientific Research, vol.56, pp.53-56.
- Kuznetsov, A. V., 1997, "Influence of the Stress Jump Condition at the Porous-Medium/Clear-Fluid Interface on a Flow at a Porous Wall". International Communications in Heat and Mass Transfer, vol.24, pp.401-410.
- Kuznetsov, A. V., 1999, "Fluid Mechanics and Transfer in the Interface Region between a Porous Medium and a Fluid Layer: A Boundary Layer Solution". Journal of Porous Media, vol.2(3), pp.309-321.
- Lee, K. And Howell, J.R., 1987. "Forced Convective and Radiative Transfer Within a Highly Porous Layer Exposed to a Turbulent External Flow Field", Proceedings of the 1987 ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conf., Vol. 2, pp.377-386
- Ocho-Tapia, J. A., Whitaker, S., 1995a, "Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-I". Theoretical development, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 38, pp. 2635-2646.
- Ochoa-Tapia, J. A., Whitaker, S., 1995b, "Momentum transfer at the boundary between a porous medium and a homogeneous fluid-II". Comparison with experiment, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 38, pp.2647-2655.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York.
- Pedras, M.H.J. and de-Lemos, M.J.S., 2001, "Simulation of Turbulent Flow in Porous Media Using a Spatially Periodic Array and a Low Re Two-Equation Closure", Numer. Heat Transfer Part A-Appl, vol. 39 (1), pp. 35-59.
- Rocamora Jr., F.D., de-Lemos, M.J.S., 2000a, "Prediction of Velocity and Temperature Profiles for Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Domains", Proc.of CONEM2000 – National Mechanical Engineering Congress (on CD-ROM), Natal, Rio Grande do Norte, Brazil, August 7-11.
- Rocamora Jr., F.D., de-Lemos, M.J.S., 2000b, "Laminar Recirculating Flow And Transfer In Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Computational Domains", Proc. of 34th ASME-National Heat Transfer Conference (on CD-ROM), ASME-HTD-1463CD, Paper NHT2000-12317, ISBN:0-7918-1997-3, Pittsburgh, Pennsylvania, August 20-22.
- Silva, R.A., de-Lemos, M.J.S., 2002, "Numerical Treatment of the Stress Jump Interface Condition for Laminar Flow in a Channel Containing a Porous Layer", Numerical Heat Transfer – Part A (in press).
- Tofaneli, L.A., de-Lemos, M.J.S. 2002a, Escoamento Laminar Em Região Espacialmente Periódica Em Canal Contendo Obstrução Porosa, Anais do CONEM2002 – Congr. Nacional de Engenharia Mecânica, Paper CPB0275, João Pessoa, PB, 12-16 de agosto.
- Tofaneli, L.A., de-Lemos, M.J.S., 2002b, Influência Da Porosidade E Da Permeabilidade De Aletas Porosas No Escoamento Em Regime Laminar Em Canal Entre Placas (aceito para apresentação), ENCIT2002 – Encontro Nacional de Ciências Térmicas, Caxambú, MG, 13-17 de outubro.

TURBULENT FLOW IN SPATIALLY PERIODIC REGION IN CHANNEL WITH A POROUS OBSTRUCTION

Luzia A. Tofaneli¹

Marcelo J.S. De-Lemos²

Departamento de Energia – IEME

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

12228-900 – São José dos Campos – S.P. - Brasil

¹e-mail: ltofa@mec.ita.br, ²e-mail: delemos@mec.ita.br

***Abstract.** In this work, numerical solutions are presented for turbulent flow in a channel containing fins made with porous material. The condition of spatially periodic cell is applied longitudinally along the channel. A macroscopic two-equation turbulence model is employed in both the porous region and the clear fluid. The equations of momentum, mass continuity and turbulence transport equations are written for an elementary representative volume yielding a set of equations valid for the entire computational domain. These equations are discretized using the control volume method and the resulting system of algebraic equations is relaxed with the SIMPLE method. Results are presented for the velocity field as a function of Reynolds, porosity and permeability of the fins.*

***Keywords.** porous media, numerical solution, turbulence*