

ANÁLISE NUMÉRICA DE UM JATO IMPINGINDO SOBRE UMA PLACA COM E SEM A PRESENÇA DE UMA CAMADA POROSA

Daniel R. Graminho¹

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: ¹graminho@mec.ita.br, ²delemos@mec.ita.br

* Corresponding author

Resumo. O presente trabalho visa analisar qualitativamente o escoamento provocado pela incidência de um jato sobre uma placa sólida, estando esta coberta ou não por uma camada porosa de diversas permeabilidades. Para o caso proposto, escoamentos laminares, bidimensionais e homogêneos foram avaliados numericamente. O meio poroso foi modelado conforme proposto pelo trabalho de De Lemos & Pedras (2000-2001). O perfil de velocidades e as linhas de corrente foram comparadas, indicando uma queda acentuada nas dimensões das bolhas de recirculação em relação ao escoamento em meio limpo. O método numérico empregado para a discretização das equações é o método dos volumes finitos com arranjo co-localizado num sistema de coordenadas não-ortogonal. O algoritmo SIMPLE é usado para correção do campo de pressão.

Palavras-chave: jato laminar, meio poroso, solução numérica, linhas de corrente.

1. INTRODUÇÃO

Jatos impingentes são comumente utilizados em diversas aplicações industriais, sobretudo como ferramentas para promover e controlar a transferência de calor e massa localizados. Dos estudos presentes na literatura, embora a maioria refira-se ao estudo da transferência de calor induzida por um jato turbulento, alguns estudos voltados aos jatos bidimensionais em regime laminar foram realizados, como o trabalho de Law et al (1984), que efetuou uma extensa análise numérica das características fluidodinâmicas de um jato bidimensional incidindo sobre uma placa plana, e Baydar (1999), que avaliou experimentalmente as características fluidodinâmicas de jatos simples e duplos colidentes a um prato. Chen et al (2000) analisou a transferência de massa induzida por um jato laminar bidimensional e Park et al (2003) fez uma comparação entre diferentes métodos numéricos na resolução do escoamento.

O estudo de meios porosos é relativamente recente, sendo extensamente explorado na última década pelo seu grande potencial em aplicações tecnológicas, sobretudo em máquinas térmicas. A performance térmica dos meios porosos foi estudada por Vafai et al (1990), avaliando a transferência de calor em um meio híbrido. Huang e Vafai (1993), analisaram a transferência de calor de uma placa plana coberta com um enxerto de camada porosa. Efeitos da inserção de um meio poroso num escoamento foram avaliados por Hadim (1994), que investigou o escoamento num canal totalmente preenchido por um meio poroso e também em canal parcialmente preenchido com enxertos porosos. A utilização de meios porosos sob jatos impingentes foi pouco explorada, sendo exemplos os trabalhos de Prakash et. al., que obteve uma visualização do escoamento de um jato turbulento incidindo sobre um meio poroso, e Fu et al (1997), que avaliou a performance térmica de diferentes camadas porosas sob um jato impingente. A avaliação dos efeitos

fluidodinâmicos induzidos por um jato laminar foi pouco estudada, sendo esse o objetivo do corrente trabalho, que visa investigar numericamente os efeitos de um jato laminar, submerso e bidimensional atuando sobre uma placa plana coberta com uma camada porosa. A modelagem do meio poroso utilizada neste artigo baseia-se no trabalho de De Lemos & Pedras (2000b,c) e (2001), que desenvolveram um modelo macroscópico de duas equações para o tratamento de meios contendo uma matriz porosa. Ao modelo, foi incorporado o trabalho de Silva & De Lemos (2001), que apresentou soluções numéricas para escoamento laminar e turbulento em um meio híbrido levando em conta o salto da tensão cisalhante na interface.

2. MODELO FÍSICO

O modelo físico analisado é mostrado na Fig. (1), representando um jato laminar incidindo normalmente sobre uma placa plana, estando esta (a) livre ou (b) coberta com uma camada porosa. A largura do jato na entrada é B e o perfil de velocidades uniformes à entrada é v_o . A distância entre a saída do jato e a placa plana é definida como H , podendo esta estar coberta com uma camada porosa ou não. No caso de presença da camada, sua espessura é h . Para o presente trabalho, h vale $H/2$. A linha tracejada à esquerda representa a condição de simetria padrão. O meio poroso é homogêneo, indeformável e inerte, com o escoamento sendo bidimensional, laminar, incompressível e em regime permanente. As propriedades do fluido são constantes e o efeito da gravidade não é considerado.

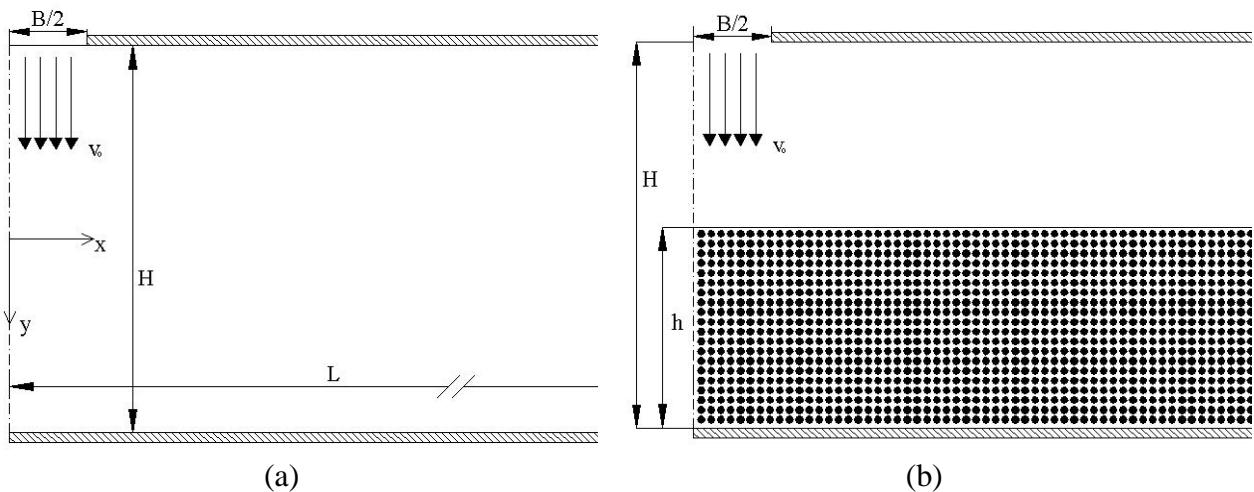


Figura 1. Geometria analisada: (a) canal limpo e (b) canal com camada porosa

3. MODELAGEM MATEMÁTICA

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

Para escoamentos em meios porosos, as equações de conservação assumem a seguinte formulação geral:

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

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

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, u_D é a velocidade média superficial ou velocidade de Darcy, x e y são as coordenadas cartesianas, \mathbf{m} a viscosidade do fluido, \mathbf{f} a porosidade e K a permeabilidade do meio. A Eq. (1) é a equação da conservação da massa e a Eq. (2) representa a conservação da quantidade de movimento. 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 do meio limpo quando \mathbf{f} vale a 1 e K tende ao infinito.

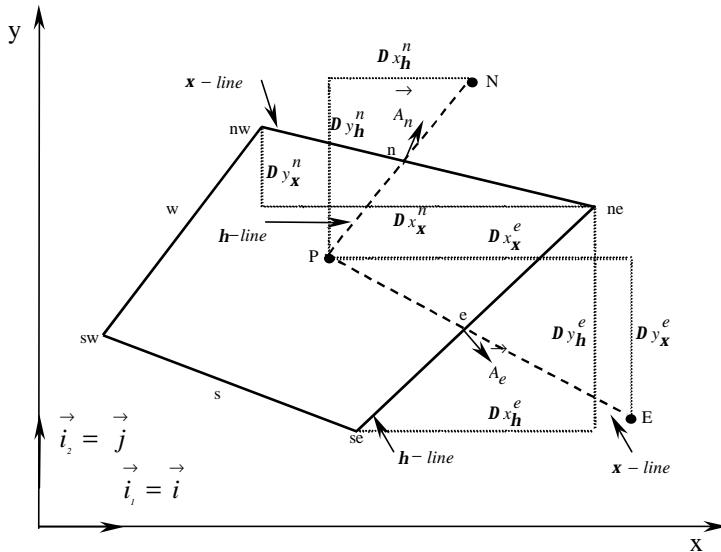


Figura 2. Volume de controle e notação

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

4. MÉTODO NUMÉRICO

As Equações (1) e (2), 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 de volumes finitos foi empregado na discretização e o algoritmo SIMPLE (Patankar (1980)) foi utilizado para o tratamento do acoplamento pressão-velocidade.

A Fig. (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,,

$$I_e + I_w + I_n + I_s = S_j \quad (3)$$

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 $\langle \mathbf{j} \rangle_p^i$, este será linearizado da seguinte forma:

$$S_j \approx S_j^{**} \langle \mathbf{j} \rangle_p^i + S_j^* \quad (4)$$

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

$$S^{*x} = (S_e^{*x})_P - (S_w^{*x})_P + (S_n^{*x})_P - (S_s^{*x})_P + S_P^* \quad (5)$$

$$S^{**x} = S_f^{**} \quad (6)$$

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 .

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação do código computacional, tomou-se como parâmetro o fator de atrito ao longo da placa sobre a qual o jato incide. Na região de estagnação, existe uma maior dificuldade na determinação precisa do coeficiente de atrito, devido à dificuldade de se calcular a tensão na parede, t_w . O escoamento se desenvolve ao longo do canal até se tornar um escoamento completamente desenvolvido entre placas paralelas, no qual uma solução exata é disponível. O coeficiente de atrito desenvolvido é definido da seguinte forma:

$$C_f = \frac{t_w}{\frac{1}{2} r v_{in}^2} \quad (7)$$

onde t_w é a tensão na parede, r é a densidade do fluido e v_{in} é a velocidade média do perfil de velocidades à entrada. Para a validação, o perfil de velocidade na entrada foi considerado completamente desenvolvido, conforme deduzido em Fox (1998).

Para o escoamento completamente desenvolvido entre duas placas paralelas, o fator de atrito pode ser calculado pela Eq. (8), conforme mostrado em Law et al (1984):

$$C_f = \frac{6}{Re(H/B)^2} \quad (8)$$

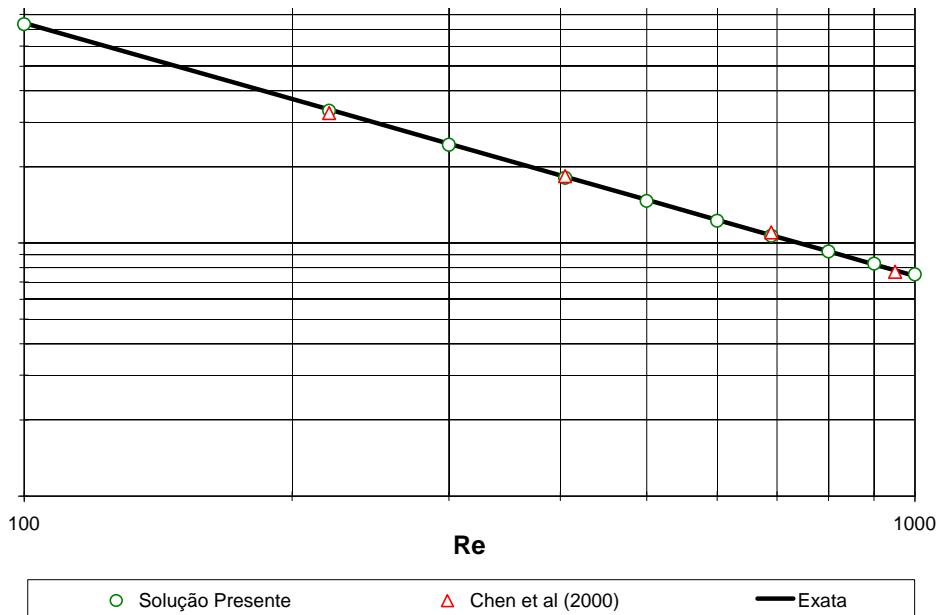


Figura 3. Variação de C_f desenvolvido com Re

Resultados para o coeficiente de atrito completamente desenvolvido são mostrados na Fig. (3). O maior erro relativo entre a solução exata e a simulação numérica apresentada neste trabalho não excedeu 1,5%. Para a simulação numérica, foi utilizada uma malha 80x120 (9600 nodos). A influência da malha computacional foi avaliada, com variação máxima de 0,5% entre uma malha menos refinada (4800 nodos) e uma malha mais refinada (16000 nodos).

A Fig. (4) mostra a variação do coeficiente de atrito ao longo da superfície alvo para meio limpo e meio poroso de diversas permeabilidades. O pico no valor de C_f surge próximo à região de estagnação, onde o fluxo na direção y sofre uma intensa desaceleração e é defletido na direção do escoamento na direção x. Com a adição da camada porosa, o fluxo na direção y se distribui mais rapidamente, como pode ser observado na Fig. (6), resultando numa desaceleração prévia do escoamento com uma menor pressão de estagnação na parede alvo. Dessa forma, o pico da curva de C_f é reduzido pela adição do enxerto poroso. A existência de valores negativos de C_f indicam a existência de uma zona de recirculação.

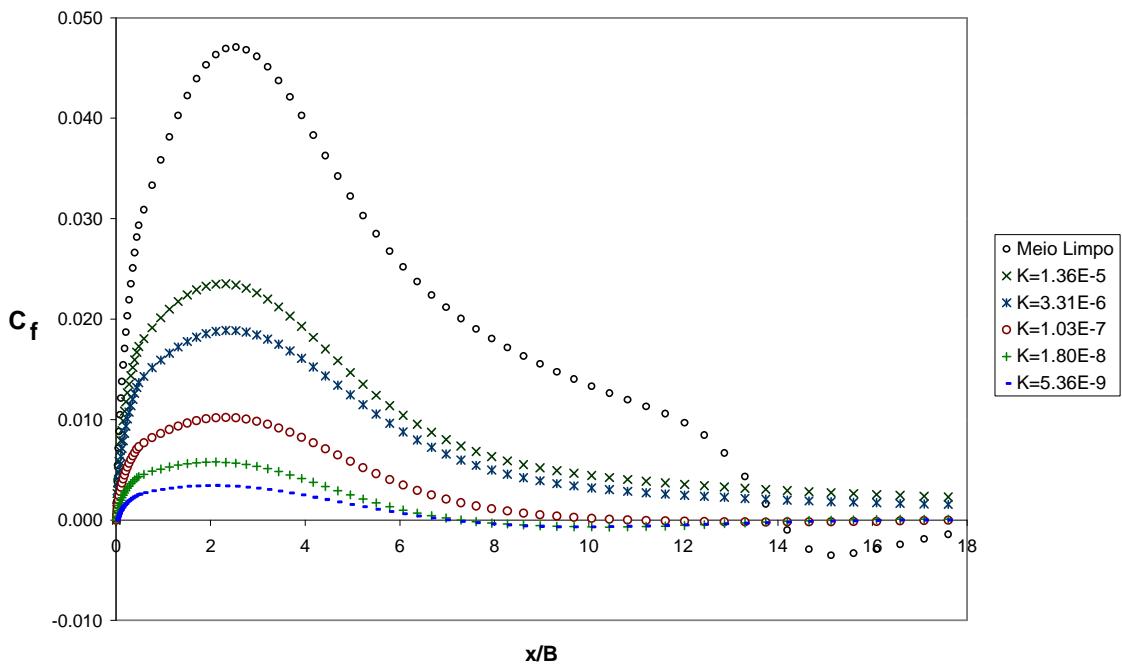


Figura 4. Distribuição de C_f ao longo da parede para $Re = 1000$, $\phi=0,6$.

A Fig. (5) mostra o contorno das linhas de corrente para o caso de um jato incidindo normalmente sobre um meio totalmente limpo. Para esse caso, observa-se claramente a presença de dois vórtices, sendo o mais próximo da região de estagnação definido como vórtice primário e o segundo chamado de vórtice secundário. Pode-se perceber uma grande influência da velocidade do jato na formação dos vórtices, com um grande aumento no tamanho destes até $Re = 400$. Acima deste valor, o crescimento da recirculação se dá de maneira menos acentuada. A presença do vórtice secundário só pode ser detectada a partir de $Re = 300$, atingindo as dimensões próximas do seu tamanho máximo em $Re = 400$.

A Fig. (6) mostra os mesmos contornos para um canal parcialmente preenchido com camada porosa de diversas permeabilidades. Com a adição do enxerto poroso, o vórtice secundário desaparece completamente e o primário tem suas dimensões bastante reduzidas. Como consequência, o escoamento se concentra na direção da parede de confinamento e a velocidade média desenvolvida no trecho limpo se torna maior que a velocidade num canal totalmente limpo, como pode ser observado pela Fig. (7).

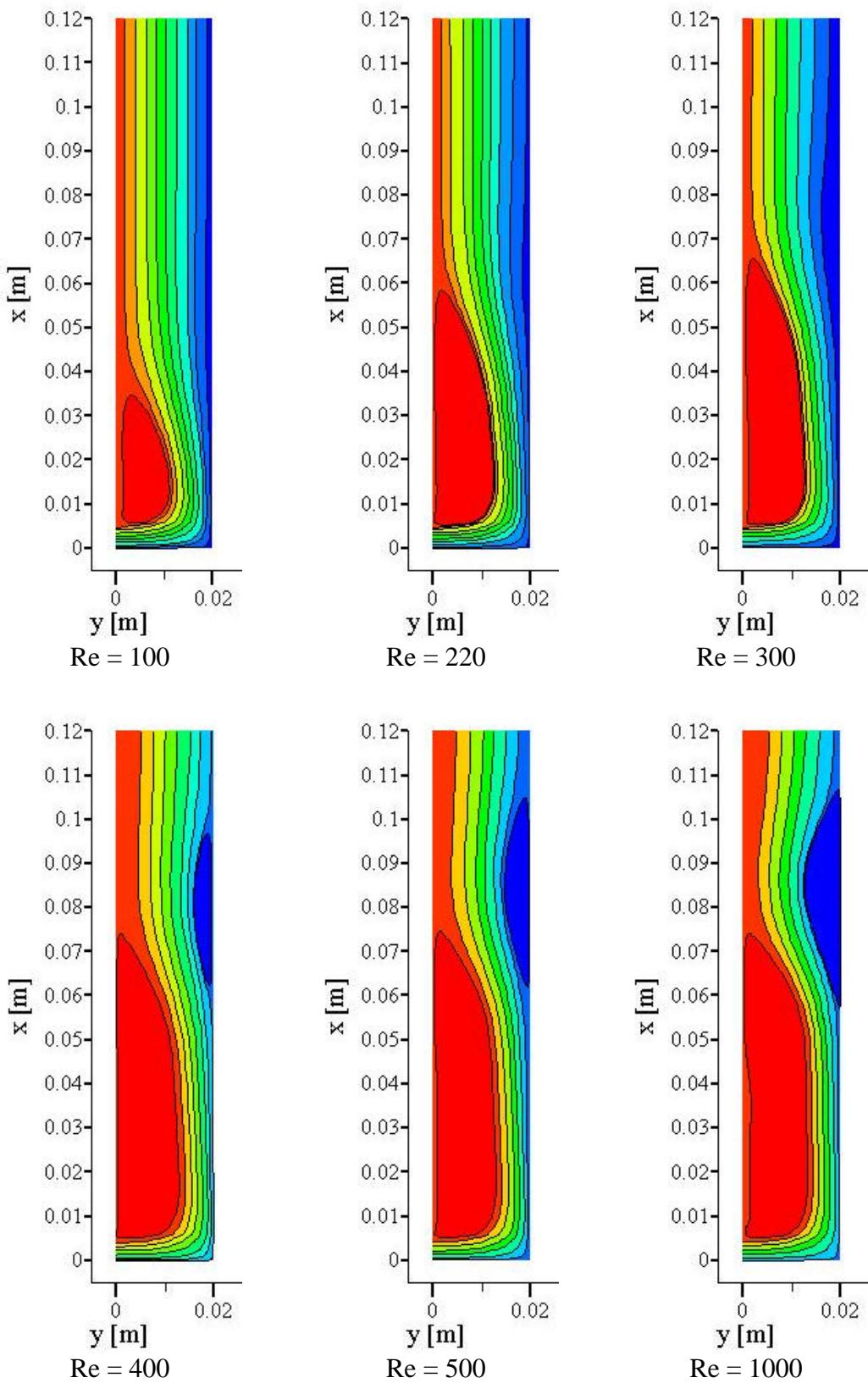


Figura 5. Comparação das linhas de corrente em meio limpo para diferentes Re com $H/B = 2$.

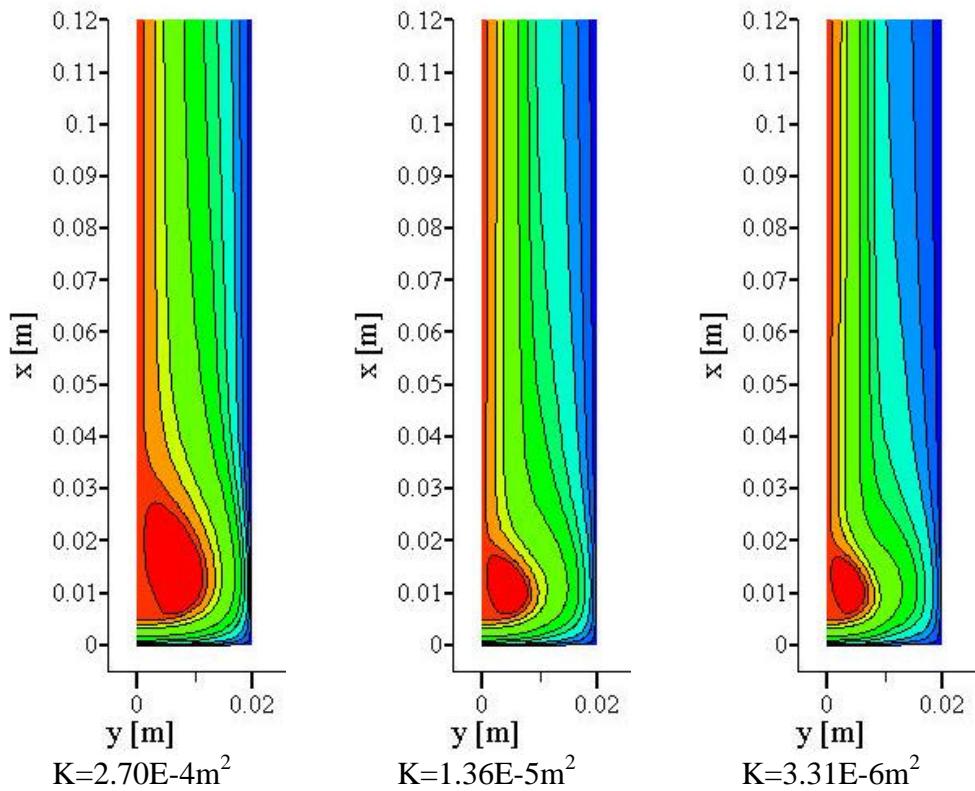


Figura 6. Comparação das linhas de corrente em meio poroso para diferentes permeabilidades com $Re = 1000$ e $H/B = 2$.

Pode-se observar que uma permeabilidade da ordem de 10^{-5} é suficiente para eliminar quase a totalidade das recirculações. Para uma permeabilidade abaixo da ordem de 10^{-7} , a penetração do fluido no meio poroso se torna muito baixa, aproximando-se do comportamento de um obstáculo sólido, como pode ser inferido da Fig. (7).

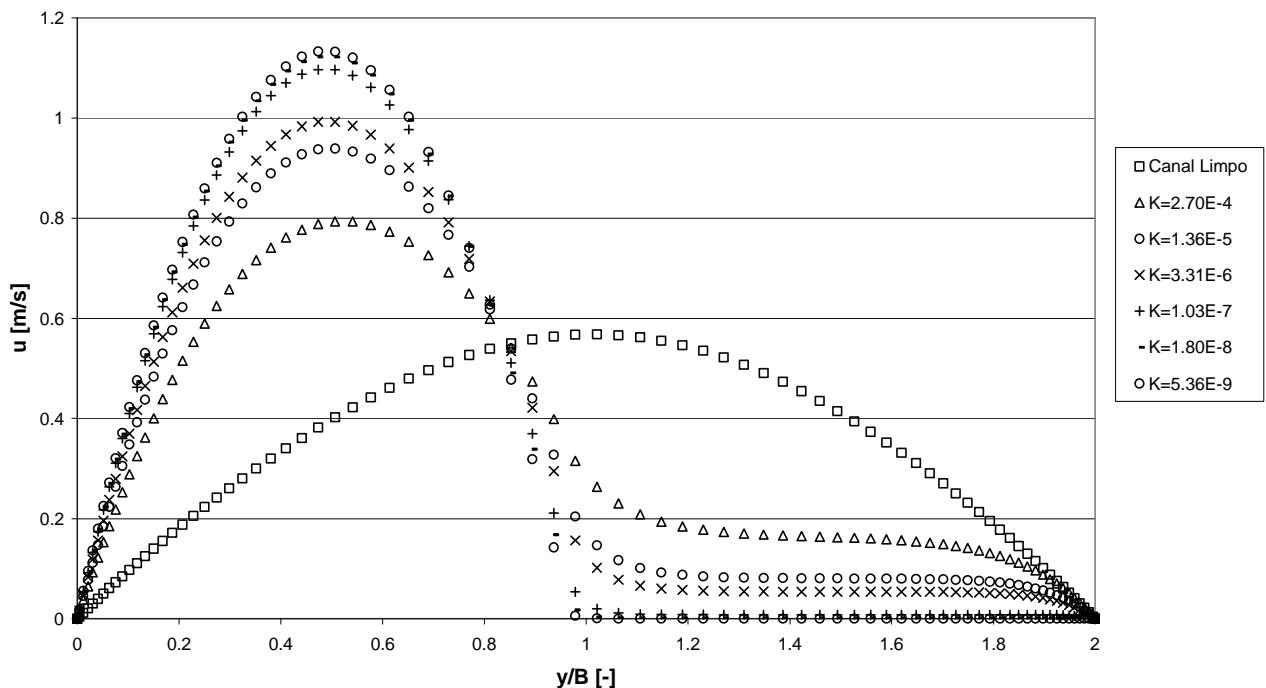


Figura 7. Perfil de velocidades à saída do canal, para $Re = 1000$ e $H/B = 2$.

5. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos, conclui-se que a adição de um meio poroso junto à parede na qual impinge o jato bidimensional contribui para a redução das bolhas de recirculação, funcionando como um regulador de fluxos. Em trabalhos futuros, pretende-se avaliar diferentes espessuras de meios porosos, para se determinar uma espessura ideal de enxerto poroso que resulte numa correção ótima do escoamento.

6. AGRADECIMENTOS

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

7. REFERÊNCIAS

- Baydar, E., 1999, "Confined Impinging Air Jet at Low Reynolds Numbers", *Experimental Thermal and Fluid Science*, 19, pp. 27-33.
- Chen, M., Chalupa, R., West, A.C., Modi, V., 2000, "High Schmidt Mass Transfer in a Laminar Impinging Slot Jet", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 43, pp. 3907-3915.
- De Lemos, M.J.S., Pedras, M.H.J., 2000a, "Simulation of Turbulent Flow Through Hybrid Porous Medium-Clear Fluid Domains", Proc. of IMECE2000-ASME-Intern. Mech. Eng. Congr., ASME-HTD-366-5, ISBN: 0-7918-1980-6, Orlando, Florida, pp. 113-122.
- De Lemos, M.J.S., Pedras, M.H.J., 2000b, "Modeling Turbulence Phenomena in Incompressible Flow Through Saturated Porous Media", Proc. of 34th ASME-National Transfer Conference (on CD-ROM), ASME-HTD-I463CD, Paper NHTC2000-12120, ISBN: 0-7918-1997-3, Pittsburgh, Pennsylvania, August, pp. 20-22.
- De Lemos, M.J.S., Pedras, M.H.J., 2000c, "Simulation of Turbulent Flow Through Hybrid Porous Medium Clear Fluid Domains", Proc. of IMECE2000-ASME-Intern. Mech. Eng. Congr., ASME-HTD-366-5, ISBN: 0-7918-1908-6, Orlando Florida, pp. 113-122.
- 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, nº4.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., 1998, "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 4^a edição, editora LTC.
- Hadim, A., 1994, "Forced convection in a porous channel with localized heat sources", *Journal of Heat Transfer*, 116, pp. 465-472.
- Huang, P.C., Vafai, K., 1993, "Flow and heat transfer control over an external surface using a porous block array arrangement." *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 36, pp. 4019-4032.
- Law, H.S., Jacob, H.M., 1984, "Numerical Prediction of the Flow Field Due to a Confined Laminar Two-Dimensional Submerged Jet", *Computers & Fluids*, Vol. 12, No. 3, pp. 199-215.
- Park, T.H., Choi., H.G., Yoo, J.Y., Kim, S.J., 2003, "Streamline Upwind Numerical Simulation of Two-Dimensional Confined Impinging Slot Jets", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 251-262.
- Patankar, S.V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York.
- Prakash, M., Turan, F.O., Li, Y., Manhoney, J., Thorpe, G.R., 2001, Impinging round jet studies in a cylindrical enclosure with and without a porous layer: Part I: Flow visualizations and simulations, *Chemical Engineering Science*, Vol.56, pp. 3855-3878.
- Prakash, M., Turan, F.O., Li, Y., Manhoney, J., Thorpe, G.R., 2001, Impinging round jet studies in a cylindrical enclosure with and without a porous layer: Part II: LDV measurements and simulations, *Chemical Engineering Science*, Vol.56, pp. 3879-3892
- Silva, R.A., de Lemos, M.J.S., 2001a, "Escoamento Laminar em um Canal Parcialmente Preenchido com Material Poroso", (em CD-ROM) COBEM2001, Uberlândia-MG.

- Vafai, K., Kim, S.J., 1990, "Analysis of surface enhancement by a porous substrate", Journal of Heat Transfer, 112, pp. 700-706.
- Fu, W.-S., Huang, H.-C, 1997, "Thermal performance of different shape porous blocks under an impinging jet", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40, No. 10, pp. 2261-2272.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

NUMERICAL ANALYSIS OF A LAMINAR IMPINGING JET ON A FLAT PLATE WITH AND WITHOUT A POROUS LAYER

Daniel R. Graminho¹

Marcelo J.S. De Lemos²

Departamento de Energia - IEME

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

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

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

Abstract: The present paper investigates qualitatively the flow that arises from a jet impinging onto a flat plate, with and without the presence of a porous layer of several permeabilities. For this case a, bidimensional, homogeneous, laminar flow was numerically investigated. Porous media was modelled as described in the work of De Lemos and Pedras (2000-2001). Velocity profiles and streamlines were compared, showing good decrease in recirculation vortices dimensions compared to clean flow. The numerical technique employed for discretizing the governing equations is the control volume method with a boundary-fitted non-orthogonal coordinate system. The SIMPLE algorithm is used to handle the pressure-velocity coupling. For numerical solution, a structured computational grid is used, refined at the incidence region.

Keywords: *impinging jet, porous media, numerical solution, streamlines.*