

CARACTERÍSTICAS FLUIDODINÂMICAS DE JATOS IMPINGENTES LAMINARES ATUANDO SOBRE UMA PLACA PLANA COBERTA COM CAMADA POROSA

Daniel R. Graminho¹

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

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 espessuras e porosidades. Para o caso proposto, escoamentos laminares, bidimensionais e homogêneos foram avaliados numericamente. O meio poroso foi modelado conforme proposto pelo trabalho de Pedras & de Lemos (2000-2001). O perfil de velocidades, campos de pressão e as linhas de corrente foram mostrados, donde se avaliou a influência da porosidade e da espessura do enxerto nas propriedades macroscópicas do escoamento. O método numérico empregado para a discretização das equações é o método dos volumes finitos com arranjo colocalizado 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 (2001a), 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 Pedras & de Lemos (2000), 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. O presente trabalho se relaciona intimamente com o trabalho de Graminho & de Lemos (2004), onde a mesma geometria é considerada, variando-se parâmetros pertinentes ao meio poroso que não foram analisados anteriormente, sendo esses a porosidade e a altura da camada porosa.

2. MODELO FÍSICO

O modelo físico analisado é mostrado na Fig. (1), representando um jato laminar incidindo normalmente sobre uma placa plana, estando esta coberta com uma camada porosa de espessura h . A largura do jato na entrada é B e o perfil de velocidades laminar e completamente desenvolvido à entrada possui velocidade média v_o . A distância entre a saída do jato e a placa plana é definida como H . Para o presente trabalho, define-se a variável adimensional h_p ,

representando o percentual da razão entre h e H . 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.

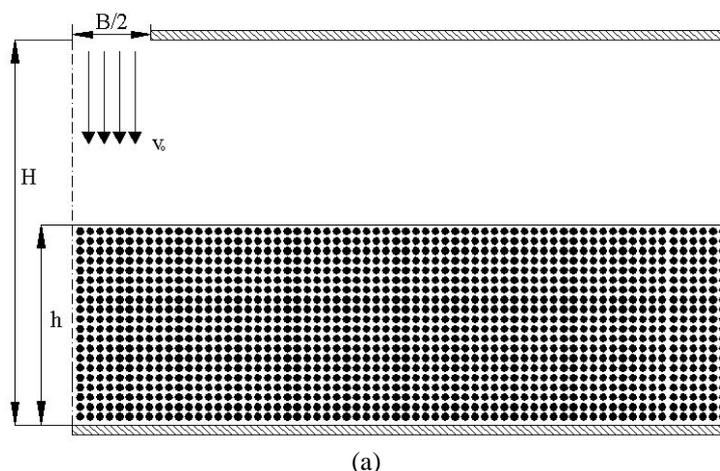


Figura 1 - Geometria analisada: Canal com camada porosa de diversas alturas porosas, h .

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 Pedras & de Lemos (2000) e Pedras & de Lemos (2001).

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

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

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

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, m a viscosidade do fluido, 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 f vale a 1 e K tende ao infinito.

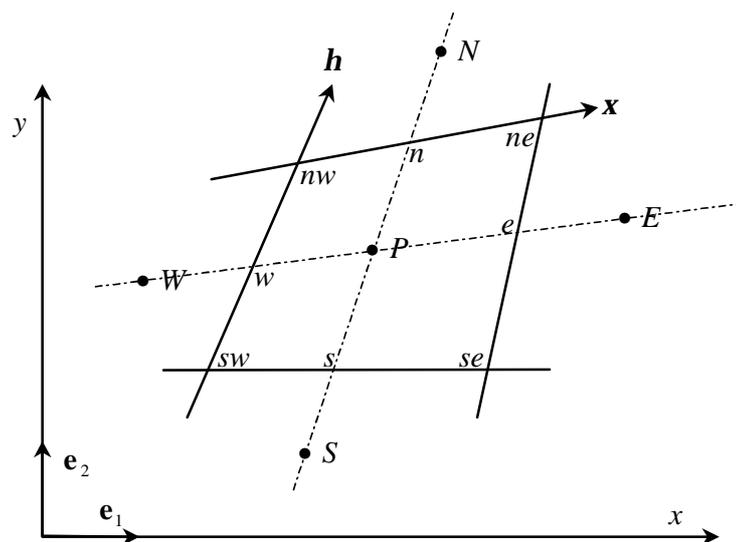


Figura 2 - Volume de controle e notação

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, $h - x$. A forma geral e discretizada da equação de conservação bidimensional de uma propriedade genérica j , em regime permanente, é dada por,,

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

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:

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

Os termos fonte nas equações da conservação da quantidade de movimento 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 simulação numérica dos casos porosos, utilizou-se uma malha 120 x 200 (24000 nodos), refinada próximo às paredes. Os resíduos computacionais utilizados foram iguais a 10^{-9} , tanto para a equação da continuidade quanto para os momentos em x e y . A validação da malha, utilizando-se o coeficiente de atrito completamente desenvolvido como

parâmetro, é mostrada na Fig. 3, em que os resultados obtidos se mostram aproximadamente intermediários aos resultados de Law *et al.* (1984) e Heiningen *et al.* (1976)

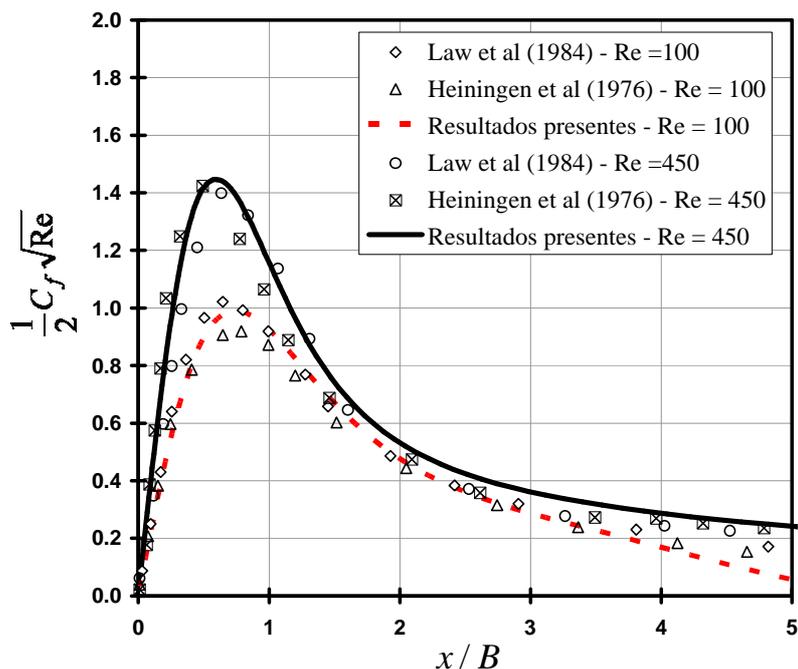


Figura 3 - Distribuição de C_f ao longo da parede de incidência para meio limpo com $H/B = 4$

A variação do coeficiente de atrito ao longo da superfície alvo é mostrada na Fig.4, em que são variados os parâmetros a) h_p e b) f , mantendo-se todas as outras variáveis fixadas.

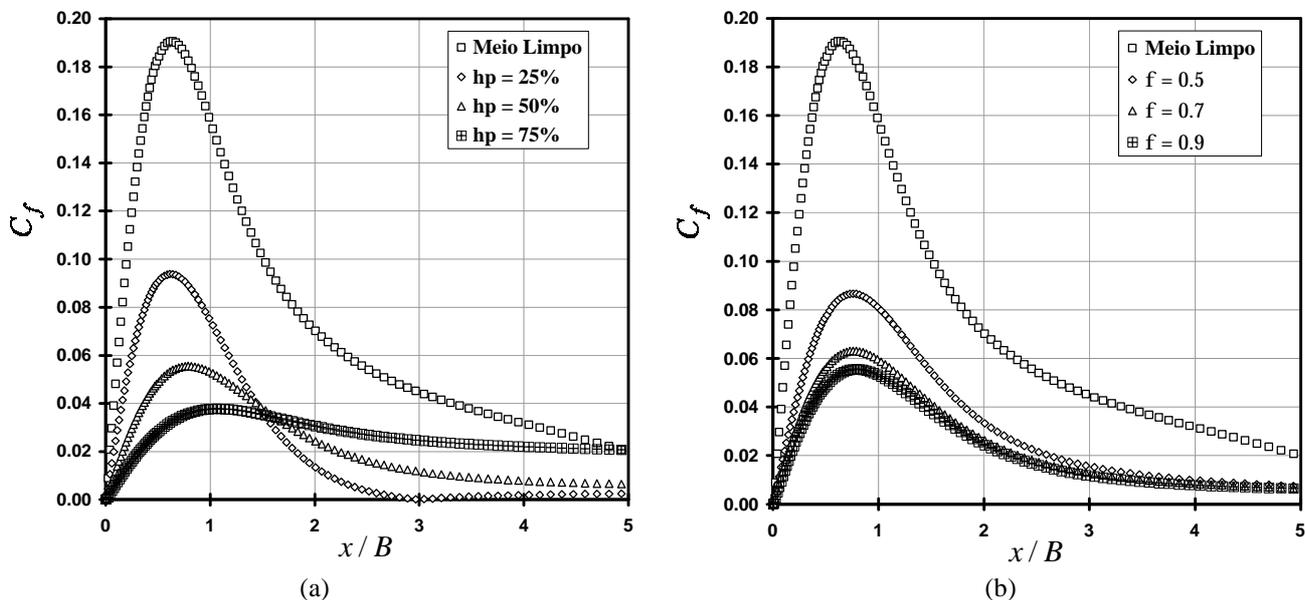


Figura 4 - Distribuição de C_f ao longo da parede de incidência com inserto poroso, para $H/B = 2$, $Re = 220$ e $K = 3.31 \times 10^{-6} m^2$. (a) $f = 0.9$ (b) $h_p = 50\%$

Analisando a figura, percebe-se que o aumento de h_p leva a uma diminuição do pico do coeficiente de atrito próximo à região de estagnação. Esse comportamento se mostra dentro do esperado, pois, com o incremento da espessura da camada porosa, o escoamento tende a se distribuir mais regularmente no meio poroso, diminuindo a velocidade do escoamento próximo à parede de colisão, reduzindo assim a tensão de cisalhamento junto à parede. Esse

efeito pode ser melhor observado através do campo de pressão do escoamento, mostrado na Fig 5. De maneira análoga ao efeito provocado pelo incremento de h_p , o aumento de f leva a uma diminuição do pico de C_f .

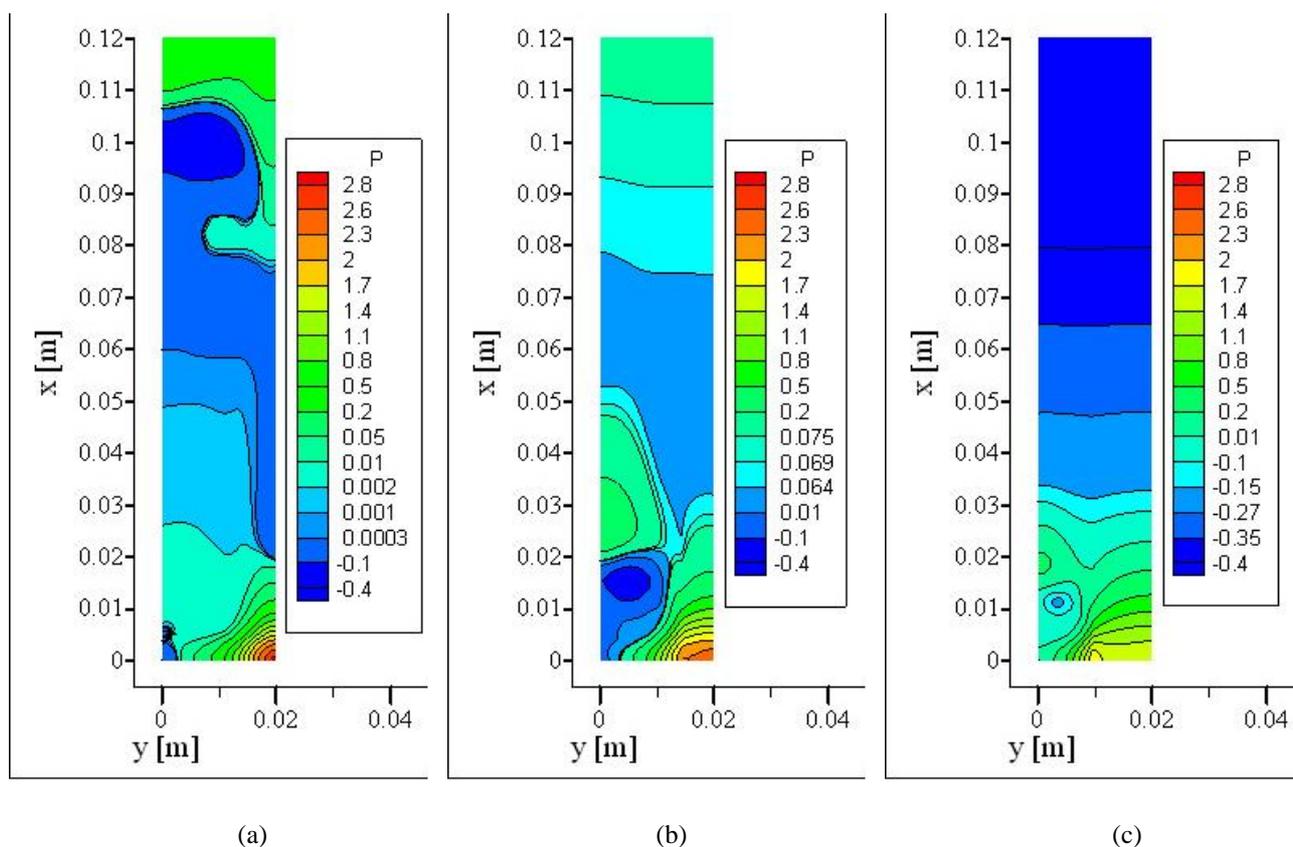


Figura 5. Campos de pressão para diferentes configurações de meios porosos, com $Re = 1000$ e $H/B = 2$.

(a) Meio Limpo (b) $h_p = 35\%$, $f = 0.9$, $K = 3.31 \times 10^{-6} m^2$ (c) $h_p = 50\%$, $f = 0.9$, $K = 3.31 \times 10^{-6} m^2$

Para uma melhor análise dos campos de pressão, a legenda destes foi levemente alterada, com a inclusão ou exclusão de algumas linhas de pressão constante a cada uma das figuras, com o objetivo de facilitar a visualização do desenvolvimento do campo. Convém lembrar que os extremos da legenda foram mantidos fixos, para manter esses campos adequadamente correlacionados.

Pelos resultados mostrados, verifica-se que a variação da pressão ao longo do escoamento é mais intensa para o meio limpo, com a pressão de estagnação coincidindo com a parede de colisão. Aumento-se h_p , a região de maior pressão tende a se afastar da parede de colisão, ocorrendo na interface entre o meio limpo e poroso. Para $h_p = 50\%$, esse deslocamento é perceptível facilmente, com a região de maior pressão localizada sobre a interface em $y = 0.01m$. Além disso, com o aumento de h_p , o campo de pressão tende a se regularizar mais rapidamente, com as linhas isobáricas tendendo ao comportamento de retas paralelas ao eixo y para um menor valor de x .

A Figura 6 mostra o contorno das linhas de corrente ao longo de todo o canal, também variando-se os parâmetros a) h_p e b) f . A variação de h_p mostra-se novamente como um fator de grande influência na dinâmica do escoamento, afetando de maneira acentuada as dimensões dos vórtices, além da intensidade de recirculação Ψ_0 para as recirculações primária e secundária. A variável adimensional Ψ_0 representa fisicamente a razão entre a vazão mássica na bolha de recirculação considerada e na região de escoamento livre. Para $h_p = 10\%$, o comportamento do escoamento ainda se mostra bastante semelhante ao apresentado pelo meio totalmente limpo, embora uma leve diminuição nas dimensões nas bolhas de recirculação seja perceptível. Ao se atingir $h_p = 35\%$, a dimensão da recirculação primária é reduzida drasticamente, enquanto que a secundária, apesar de visualmente indicar uma grande aumento do vórtice, representa uma parcela de apenas 0.82% da vazão mássica do escoamento desenvolvido, contra 19.65% apresentado pelo mesmo vórtice na configuração anterior, conforme mostrado na Tab. 1. Com o incremento posterior de h_p , a recirculação secundária desaparece completamente, enquanto que a primária continua a ter suas dimensões e intensidade de recirculação diminuída, embora de maneira menos acentuada. Pela análise das linhas de corrente, também nota-se que, para menores valores de h_p , o escoamento tende a se deslocar na direção do meio limpo, com uma penetração relativamente baixa ao meio poroso. A partir de $h_p = 75\%$, a penetração no meio poroso se intensifica, com um aumento

da espessura das linhas de corrente na parte limpa, aproximando-se da espessura obtida no meio poroso. Para $h_p = 90\%$, o escoamento se encontra muito próximo do igualmente distribuído. Essa característica pode ser melhor observada pelo perfil de velocidades à saída do canal, mostrado na Fig.8, em que o pico de velocidades se encontra na parte limpa do canal para todos os valores de h_p . Com o incremento deste, porém, o valor de $u_{máx}$ aumenta, indicando que uma parcela maior da vazão se encontra no meio limpo. A partir de $h_p = 75\%$, o valor desse pico começa a diminuir, até atingir um valor bastante próximo do constante quando $h_p = 90\%$, indicando um aumento da distribuição de fluxos ao longo do canal.

Ao contrário de h_p , a variação de f não parece ter uma influência muito forte sobre o escoamento. O aumento de f provoca uma leve queda nas dimensões da recirculação primária, conforme mostra a Fig. 7, enquanto que a intensidade de recirculação se mantém aproximadamente constante, como pode ser inferido da Tab. 2. Essa pequena influência de f no escoamento também pode ser evidenciada pelo perfil de velocidades à saída do canal, mostrado na Fig. 9, onde a variação deste parâmetro provoca apenas uma leve oscilação nos resultados, em comparação a parâmetros como a altura do inserto poroso e a permeabilidade deste, estudada em Graminho & de Lemos (2004).

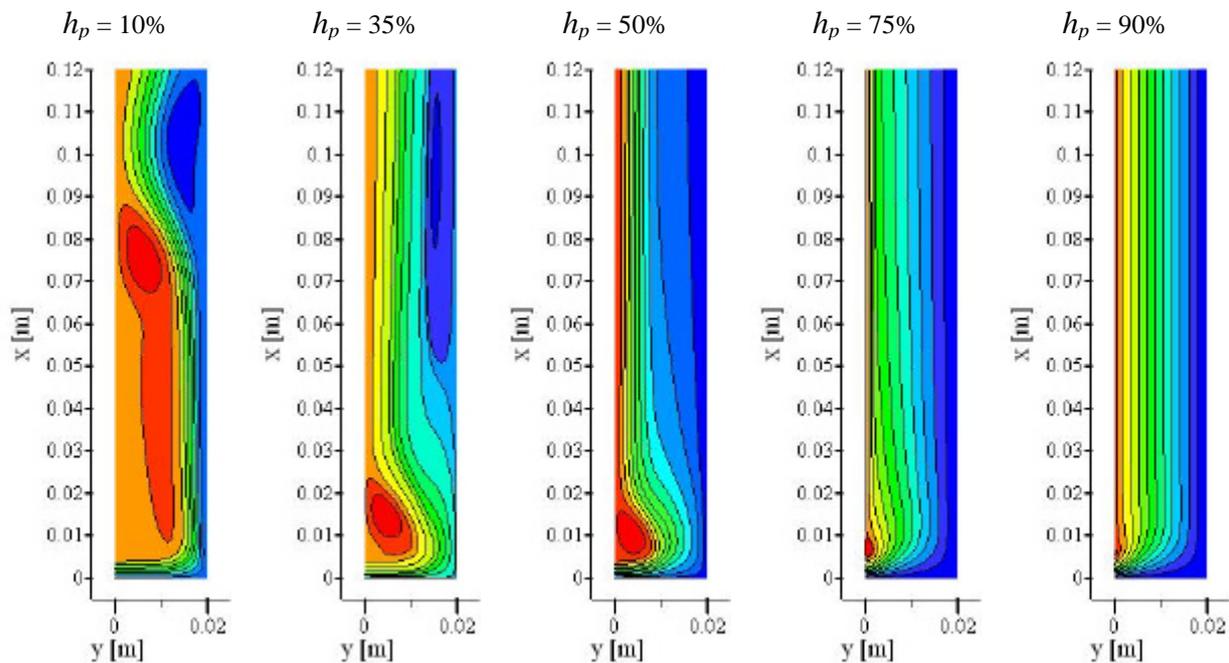


Figura 6. Comparação da linhas de corrente variando-se h_p

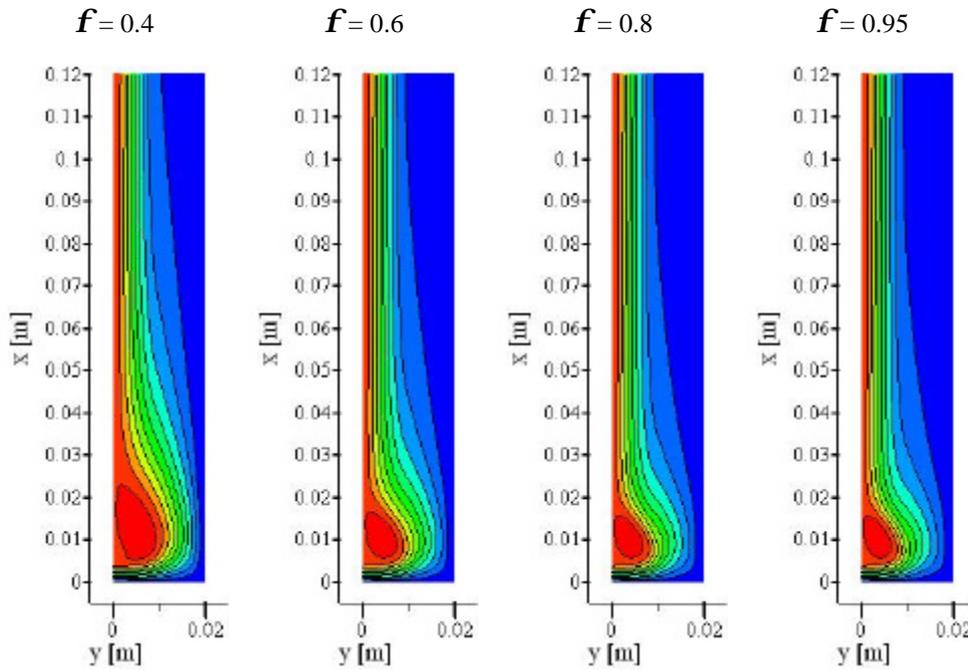


Figura 7. Comparação da linhas de corrente variando-se f

Tabela 1. Influência de h_p na intensidade de recirculação dos vórtices primário e secundário para $f = 0.4$, $K = 3.31E-6$, $\dot{m} = 0.0119 \text{ Kg/s}$ e $Re = 1000$

$f = 0.4 / \dot{m} = 0.0119 \text{ Kg/s}$					
Ψ_0	$h_p = 10\%$	$h_p = 35\%$	$h_p = 50\%$	$h_p = 75\%$	$h_p = 90\%$
Primária	0.34	0.22	0.12	0.02	0.00
Secundária	0.20	0.01	0.00	0.00	0.00

Tabela 2. Influência de f na intensidade de recirculação dos vórtices primário e secundário para $h_p = 50\%$, $K = 3.31E-6$, $\dot{m} = 0.0119 \text{ Kg/s}$ e $Re = 1000$

$h_p = 50\% / \dot{m} = 0.0119 \text{ Kg/s}$					
Ψ_0	$\phi = 0.4$	$\phi = 0.5$	$\phi = 0.6$	$\phi = 0.8$	$\phi = 0.95$
Primária	0.11	0.12	0.12	0.12	0.12
Secundária	0	0	0	0	0

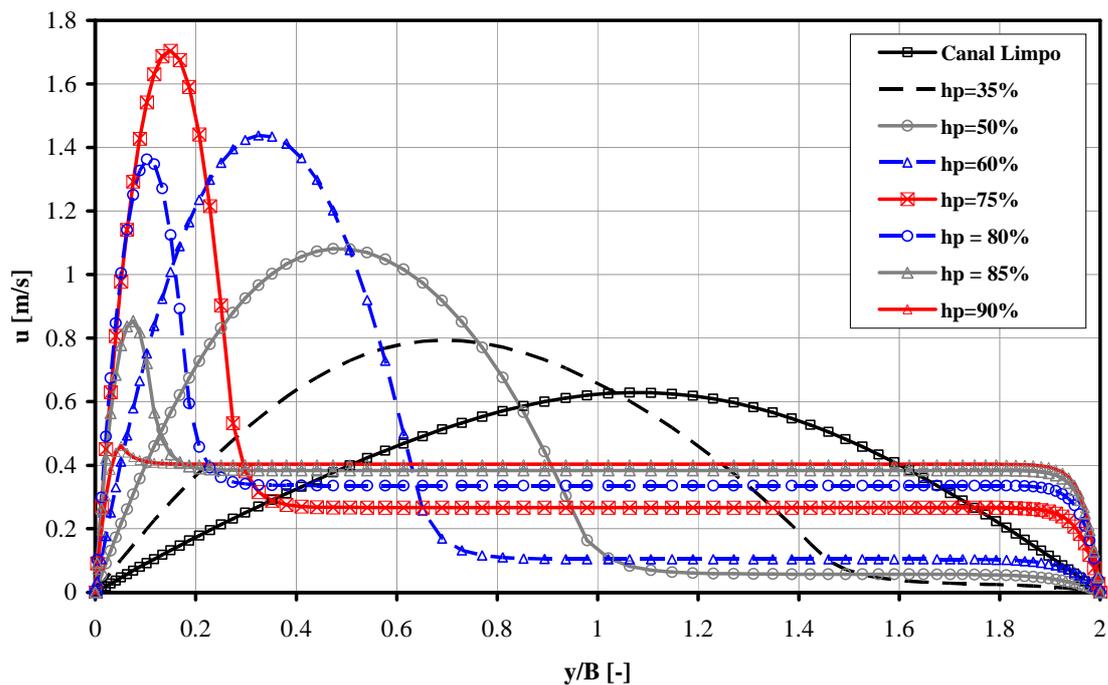


Figura 8. Perfil de velocidades à saída do canal, para $Re = 1000$ e $H/B = 2$, $f = 0.9$, $K = 3.31 \times 10^{-6} m^2$

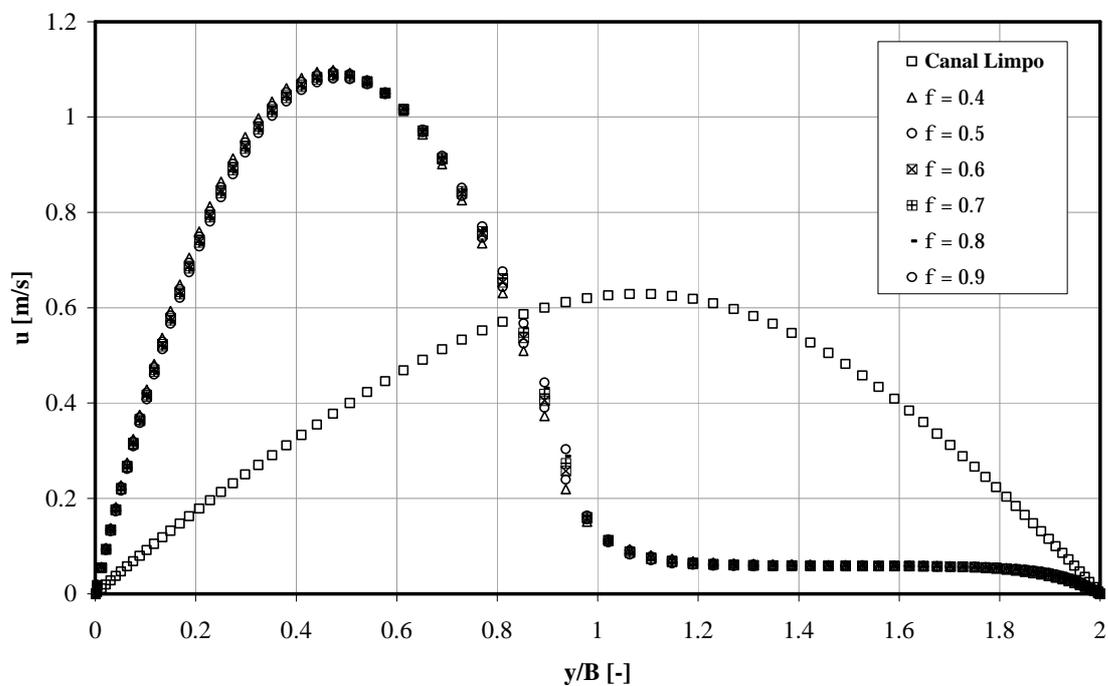


Figura 9. Perfil de velocidades à saída do canal, para $Re = 1000$ e $H/B = 2$, $h_p = 50\%$, $K = 3.31 \times 10^{-6} m^2$

6. Conclusões

Analisando-se os resultados obtidos, conclui-se que a adição de um meio poroso junto à parede na qual incide um jato bidimensional laminar contribui para a redução das bolhas de recirculação, atuando como o regulador de fluxos. A influência da porosidade no escoamento mostrou-se bastante baixa em comparação com a altura do inserto poroso. Essa qualidade leva a conclusão que a escolha de um material poroso a ser utilizado numa aplicação industrial ou científica, visando especificamente a redução das zonas de recirculação e rápida distribuição de fluxo, pode ser feita com base em apenas dois parâmetros, a permeabilidade e a altura do inserto poroso. Em trabalhos futuros, pretende-se analisar o efeito da perda de carga provocada pela inserção do meio poroso no escoamento.

7. AGRADECIMENTOS

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

8. DIREITOS AUTORAIS

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

9. 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*, pp. 113-122, ISBN: 0-7918-1980-6, Orlando, Florida, November 5-10.
- 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 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*, 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, nº4, 2001.
- Fox, R.W., McDonald, A.T., "Introdução à Mecânica dos Fluidos", 4ª edição, editora LTC, 1998.
- Hadim, A., 1994, "Forced convection in a porous channel with localized heat sources", *Journal of Heat Transfer*, 116, 465-472.
- Heiningen, A.R.P., Mujumdar, A.S., Douglas, W.J.M., 1976, "Numerical Prediction of the Flow Field and Impingement heat transfer due to a laminar slot jet", *Trans. A.S.M.E Journal of Heat Transfer*, 98, 654-658.
- 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, 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 Visualisations And Simulations*, *Chemical Engrg 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: DLV Measurements And Simulations*, *Chemical Engrg 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, 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.

Graminho, D.R., De Lemos, M.J.S., 2004, "Análise numérica de um jato impingindo sobre uma placa com e sem a presença de uma camada porosa." (em CD-ROM) CONEM2004, Belém-PA (submetido)

FLOW CHARACTERISTICS OF LAMINAR IMPINGING JET ONTO A FLAT PLATE COVERED WITH 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 the presence of a porous layer of several porosities and porous layer thickness. For this case a, bidimensional, homogeneous, laminar flow was numerically investigated. Porous media was modelled as described in the work of Pedras & de Lemos (2000-2001). Velocity profiles and streamlines were compared, showing that porosity almost doesn't have influence in recirculation vortices dimensions for a fixed permeability. 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.*