

ESCOAMENTO TURBULENTO MACROSCÓPICO EM UM CANAL COM UM LEITO POROSO FORMADO POR HASTES SÓLIDAS

Renato A. Silva

Marcelo J.S. de Lemos¹

Departamento de Energia – IEME

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

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

¹Autor para correspondência, delemos@ita.br

Resumo. Neste trabalho é utilizado o conceito da média volumétrica para transportar os resultados numéricos, obtidos em um canal parcialmente preenchido com diversas hastes sólidas, do domínio “microscópico” para o domínio macroscópico. Através desta metodologia são obtidos os valores de permeabilidade e de porosidade da camada porosa, além disso, são analisados os efeitos do número de Darcy e da porosidade no comportamento do escoamento. Os resultados numéricos obtidos mostraram a necessidade de se contabilizar o efeito do regime do escoamento no cálculo da permeabilidade do meio poroso. Além disso, o comportamento dos resultados distribuídos encontrados na literatura corrobora o comportamento dos resultados aqui apresentados, indicando, em última análise, que a metodologia de integração utilizada preserva a maioria das informações do escoamento distribuído.

Palavras chave: escoamento turbulento, média volumétrica, meio poroso, meio limpo, método numérico.

1. Introdução

Os fenômenos de transporte em um canal com leito poroso são de interesse de várias áreas da ciência e engenharias tais como: hidrologia, sismologia, engenharia de petróleo, onde se faz necessário o entendimento da influência que esta região exerce sobre o comportamento do escoamento. Kuwahara et al. (1998) resolveram o escoamento interno a um meio poroso infinito formado por hastes quadradas com um arranjo espacialmente periódico, utilizando um modelo de turbulência de baixo Reynolds. Os autores constataram a presença de turbulência em $Re_H > 10^4$ e que nessas condições o modelo estendido Darcy-Forchheimer apresenta bons resultados. Pedras e de Lemos (2001a-b) desenvolveram um modelo macroscópico de turbulência onde uma constante foi introduzida na equação da energia cinética de turbulência. O valor desta constante foi obtido através da simulação numérica do escoamento em um meio poroso formado por hastes cilíndricas, com um arranjo espacialmente periódico. Esta constante foi posteriormente ajustada para hastes elípticas longitudinal e transversal em Pedras e de Lemos (2001c e 2003). Silva e de Lemos (2003a-b) estenderam o modelo macroscópico de Pedras e de Lemos (2001a-b) para levar em conta a condição de salto de tensão cisalhante na interface proposto em Ochoa-Tapia e Whitaker (1995a). Prinos et al. (2003) investigaram numérica e experimentalmente as características do escoamento turbulento em um canal aberto com uma camada porosa formada de hastes cilíndricas. Neste trabalho, as equações de Navier-Stokes média, juntamente com modelo $k-\varepsilon$ de baixo Reynolds são numericamente resolvidas na fase líquida ao redor das hastes sólidas. Na abordagem experimental foi utilizado um anemômetro de fio quente para medir os valores das velocidades médias e das tensões turbulentas. Os autores mostraram que os valores de velocidade na região limpa, tanto numericamente quanto experimentalmente diminuem com o aumento do número de Darcy, devido à intensa troca de quantidade de movimento próximo a interface entre o meio limpo e o meio poroso, e a correspondente penetração da turbulência na camada porosa para meios altamente permeáveis. Além disso, os autores constataram através de simulação numérica uma redução significativa da capacidade de descarga do canal, quando comparada com um canal com uma parede impermeável localizada na interface. Para escoamento laminar, Prinos et al. (2003), mostraram efeitos opostos do meio poroso sobre o escoamento no meio limpo. Kuznetsov e Xiong (2003) investigaram o escoamento em um duto parcialmente preenchido com material poroso, considerando que o escoamento é laminar devido à baixa penetração da turbulência na região porosa e na região limpa, turbulenta. No entanto este tipo de consideração é válido apenas para meios porosos com baixa permeabilidade. Kuznetsov e Becker (2004) propuseram um modelo matemático que levou em conta o efeito da rugosidade da interface entre um meio poroso e um meio limpo no comportamento termo-hidrodinâmico do escoamento turbulento, e constataram que esta abordagem leva a valores de Nusselt ligeiramente superiores aos encontrados para uma interface lisa. Breugem et al. (2004-2005) e Breugem e Boersma (2005) utilizaram a Simulação Numérica Direta (SND) para avaliar o fechamento do termo de arrasto na equações macroscópicas de Navier-Stokes e de dois modelos de transferência de quantidade de movimento para escoamento laminar sobre uma parede porosa. Os autores mostraram que a solução analítica de Ochoa-Tapia e Whitaker (1995b), para o perfil de velocidade, baseado no modelo de transferência de quantidade de movimento para a região de interface, apresentou uma boa concordância com a Simulação Numérica Direta. Além disso, os resultados mostraram que a permeabilidade depende não somente da porosidade, mas também do gradiente da velocidade de Darcy, implicando numa mudança para desenvolver novos

modelos para a variação da permeabilidade na região de interface. Silva e de Lemos (2005a-b) investigaram a interação entre as camadas de fluido acima e abaixo da interface entre um meio limpo e um meio contendo hastes sólidas. Os autores constataram, para escoamento laminar em um canal parcialmente preenchido com hastes sólidas, que a intensidade de mistura entre as camadas de fluido é inversamente proporcional ao número de Darcy. Por outro lado, para o escoamento turbulento, a intensidade de mistura entre as camadas de fluido e a penetração da turbulência na camada de hastes são diretamente proporcionais ao número de Darcy, isto é, o aumento do número de Darcy leva a um aumento da mistura entre as camadas de fluido e, conseqüentemente, da penetração da turbulência na camada com hastes.

Neste trabalho será apresentado a metodologia de integração utilizada para “passar” os resultados distribuídos ou “microscópicos” obtidos para o escoamento turbulento em Silva e de Lemos (2005b), para o domínio macroscópico. Para isto, serão utilizados os conceitos de média volumétrica e de célula de cálculo. Além disso, o efeito da porosidade e do número de Darcy no comportamento dos resultados macroscópicos serão analisados.

2. Metodologia de Integração

Os resultados numéricos obtidos em Silva e de Lemos (2005a) foram integrados na célula de cálculo apresentada na Figura 1, a qual percorre todo o domínio com deslocamento transversal (passo de integração), δ , (vide Figura 1), usando o conceito da média volumétrica, h_c é a distância entre a parede e o centro da terceira haste.

Para a escolha desta célula de cálculo foram levadas em conta as seguintes considerações, propostas em Breugem (2004):

i) A célula de cálculo deve-se ajustar à topologia do meio poroso;

ii) Garantir que o campo de escoamento mediado no volume da célula seja contínuo, isto é, que o tamanho da célula deve ser suficientemente grande tal que nenhuma condição de contorno seja necessário no interior do meio poroso. Por outro lado, o tamanho da célula de cálculo deve ser suficientemente pequena para preservar a maioria das informações do escoamento distribuído no campo do escoamento mediado no volume (integrado);

iii) Que a variação entre a propriedade mediada no volume de uma célula e da célula subsequente seja pequena.

Com o uso da célula de cálculo surge a relação entre o volume de fluido, V_f , e o volume total, V_t , da célula, que é definido como porosidade, $\phi_c = V_f/V_t$, uma das propriedades que definem o meio poroso. Note, na Figura 1, que a camada porosa é dividida em duas regiões, uma região onde a porosidade é constante (meio poroso homogêneo) e uma região onde a porosidade varia (região de interface), ou seja, onde o volume de fluido aumenta. A região onde o volume de fluido é igual ao volume total é denominado meio limpo, ou seja, $\phi_c=1$. Esta célula de cálculo foi construída para a integração dos resultados distribuídos num canal com hastes cilíndricas, posteriormente, foi aplicado aos casos com hastes elíptica transversal, quadrada e elíptica longitudinal.

As propriedades do escoamento foram integradas no volume da célula de cálculo, mostrada na Figura 1, utilizando o conceito da média volumétrica, onde a propriedade do escoamento associada ao volume de fluido, ΔV_f , é ponderada pelo volume total da célula de cálculo, ΔV_t , da seguinte forma:

$$\langle \varphi \rangle^v = \frac{1}{\Delta V_t} \int_{\Delta V_f} \varphi dV \quad (1)$$

onde φ pode ser a velocidade axial, u , ou transversal, v . Note que o sobrescrito v indica média volumétrica.

Além da porosidade, para caracterizar o meio poroso é necessária a definição de outra propriedade denominada permeabilidade, K_c , que indica a facilidade com que fluido permeia a estrutura porosa. Para estimar a permeabilidade foi utilizado a lei de Darcy (1856), que é expressa por

$$\mu \mathbf{u}_D = -K_c \nabla \langle P \rangle^i \quad (2)$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido, \mathbf{u}_D é a velocidade de Darcy e $\langle P \rangle^i$ é a média intrínseca da pressão no fluido. No entanto, esta relação é restrita a escoamentos onde as forças viscosas sobrepujam as forças de inércia. Para simular esta condição foi realizado um experimento numérico numa célula, vide área hachurada na Figura 1, com condição inicial de fluxo mássico prescrito, onde $Re_H < 0,1$, e condições de contorno de periodicidade espacial nas faces oeste e leste, e de simetria nas faces norte e sul.

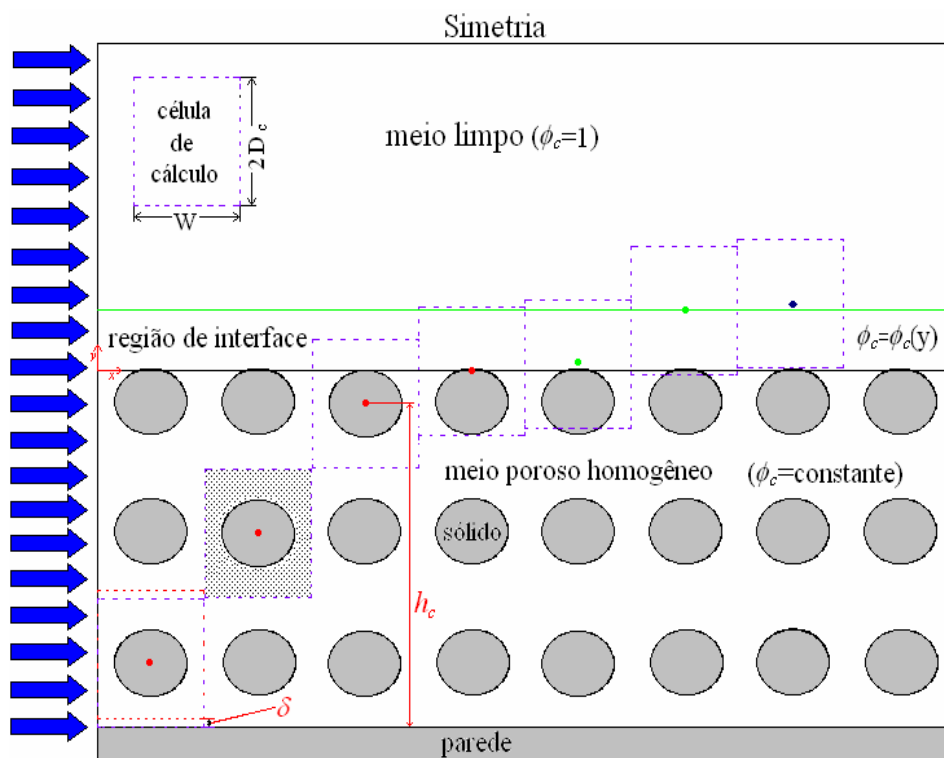


Figura 1: Exemplo do esquema de integração dos resultados “microscópicos” em um canal parcialmente preenchido com haste cilíndrica.

3. Resultados

Na Tabela 1 foi mostrado o valor da porosidade, ϕ_c , calculado na região homogênea, da permeabilidade, K_c , estimada através da célula hachurada apresentada na Figura 1 e do número de Darcy ($Da_c = K_c / H_d^2$). Note a altura da camada porosa, H_d , apresenta uma defasagem de 0,01 em relação a altura do canal, H , inicialmente definida (vide Silva e de Lemos (2005a)), isto se deve a localização das propriedades integradas no centro da célula de cálculo. Como esperado, o valor da porosidade aumenta com o aumento do volume de fluido na célula de cálculo, ou seja, o aumento do comprimento da célula, W . Além disso, observa-se um aumento do valor da permeabilidade, K_c , com a diminuição da resistência imposta ao escoamento pela forma da haste e com o aumento do valor da porosidade, ϕ_c , indicando uma dependência da permeabilidade com a porosidade.

A Tabela 2 apresenta o valor da espessura da camada porosa homogênea, h_{pm} , a espessura da região de interface, e_i , e a altura da haste, h^* . Note que a espessura da camada porosa homogênea, h_{pm} , diminui com o aumento da altura da haste, h^* . Por outro lado, a espessura da região de interface, e_i , aumenta com o aumento da altura da haste, h^* . Este comportamento, indica a dependência da espessura da camada porosa homogênea, h_{pm} , e da espessura da região de interface, e_i , da altura da haste, h^* .

Tabela 3 apresenta os valores de porosidade, ϕ_c , Darcy, $Da_c = K_c / H_d^2$, e Reynolds, $Re_{H_d} = \rho U_D H_d / \mu$, baseado na altura do canal, H_d . Observe que o aumento da vazão no canal, indicado pelo número de Reynolds, se deve ao aumento do número de Darcy. No entanto, para os casos com meio poroso formado de hastes quadradas e ou com $\phi_c=0,7382$ (vide Tabela 1) ocorre uma substancial canalização do escoamento entre as hastes (vide Silva e de Lemos (2005b)), fazendo com que a vazão para estes casos seja superior ao esperado, ou seja, a vazão encontrada para haste quadrada com $\phi_c=0,7382$ ou $\phi_c=0,8429$ é superior a vazão encontrada para outras morfologias, além disso, a vazão observada na tabela 3 para $\phi_c=0,7382$ é superior a vazão constatada para $\phi_c=0,8429$. Este comportamento indica que há canalização do escoamento para $\phi_c=0,7382$.

Nas Figuras 2a e 2b são mostrados os perfis de porosidade ao longo da seção transversal do canal parcialmente preenchido com material poroso, para $W=0,015m$ e $W=0,025m$, respectivamente. Observe que existe uma região onde o valor da porosidade permanece constante, uma região onde o valor da porosidade aumenta progressivamente (região de interface, indicada na Figura), até atingir o valor de meio limpo, ou seja, $\phi_c=1$. Note que a espessura da região de interface não depende do comprimento do canal, W , apenas da forma da haste (vide Tabela 2). Além disso, observa-se uma variação linear da porosidade com a forma da haste e a posição, na região de interface.

Na Figura 3a (note que a linha tracejada delimita a região de interface de maior espessura da região de interface) foi evidenciado o efeito do número de Darcy no perfil de velocidade axial, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,075m$. Note que há uma diminuição da vazão no canal e da penetração do escoamento na camada porosa, com a diminuição do número de Darcy. No entanto, para $Da_c=1,1360 \times 10^{-3}$, ocorre o inverso, isto é, há um aumento da vazão no canal e na penetração do escoamento na camada porosa, este comportamento se deve a canalização do escoamento ocasionado pela forma da haste que compõe o meio poroso, vide Silva e de Lemos (2005b).

A Figura 3b mostra a influência do número de Darcy no perfil de velocidade axial, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,095m$. Observe que a utilização do conceito da média volumétrica para a obtenção do perfil de velocidade integrado reproduz o mesmo comportamento dos perfis de velocidade evidenciados no trabalho de Silva e de Lemos (2005b), que investiga o escoamento turbulento em um canal com hastes sólidas. Além disso, para $Da_c=7,0806 \times 10^{-4}$ há uma maior penetração do escoamento na camada porosa homogênea, próxima a região de interface.

Na Figura 3c foi apresentado o efeito de Darcy no escoamento em um canal parcialmente preenchido com material poroso, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,115m$. Note que o aumento do número de Darcy implica no aumento da vazão, por outro lado, a maior vazão no canal é encontrada para $Da_c=4,8319 \times 10^{-4}$, isto ocorre devido a canalização do escoamento, ocasionado pela forma da haste que forma a camada porosa. Observe ainda, que existe uma região porosa dentro da camada porosa homogênea, onde a permeabilidade determina a vazão.

A Figura 4a apresenta a influência do número de Darcy no comportamento do escoamento, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,075m$. Observe que, quanto maior o valor do número de Darcy, maior a penetração do escoamento na camada porosa. Além disso, os maiores valores de Darcy implicam nas maiores vazões. No entanto, a maior vazão no canal é encontrada para meio poroso formado de hastes quadradas ($Da_c = 1,5543 \times 10^{-3}$), este comportamento se deve a canalização do escoamento devido a forma da haste.

Na Figura 4b foi mostrado o efeito do número de Darcy no comportamento do escoamento em um canal parcialmente preenchido com material poroso, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,095m$. Note que o aumento do número de Darcy implica numa maior vazão no canal e numa maior penetração do escoamento na camada porosa, respectivamente. Observe ainda, que no caso com $Da_c=9,6876 \times 10^{-4}$, ocorre a canalização do escoamento no meio poroso, ocasionando uma vazão no canal maior que a esperada.

A Figura 4c evidencia a influência do número de Darcy no perfil de velocidade axial, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,115m$. Observe que nos casos com meio poroso formado de hastes elíptica transversal, cilíndrica e elíptica longitudinal, respectivamente, quanto maior o número de Darcy (vide Tabela 3) maior a vazão no canal, porém, a maior vazão no canal é encontrada para o meio poroso formado de haste quadrada, este comportamento se deve a canalização do escoamento. Por outro lado, o aumento do número de Darcy implica num aumento da penetração do escoamento na camada porosa.

Na Figura 5a foi investigado o efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,075m$. Note que existe um aumento na penetração da turbulência na camada porosa com o aumento do número de Darcy. Além disso, os picos de energia cinética de turbulência estão localizados na interface entre o meio limpo e a região de interface.

A Figura 5b mostra a influência do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,095m$. Observe que a penetração da turbulência na camada porosa para $Da_c=7,0806 \times 10^{-4}$ e $Da_c=7,2585 \times 10^{-4}$, são praticamente iguais, no entanto, para $Da_c=1,1080 \times 10^{-3}$ ocorre uma maior penetração da turbulência no meio poroso. Note ainda, que os picos de energia cinética de turbulência ocorrem na interface entre o meio limpo e o meio poroso.

Na Figura 5c apresenta o efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,7382$ e $H_d=0,115m$. Os picos de energia cinética de turbulência ocorrem na interface entre o meio limpo e o meio poroso, como mostrado na Figura. Observe ainda, que o aumento do número de Darcy implica num aumento da penetração da turbulência no meio poroso.

Na Figura 6a é analisado a influência do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,075m$. Observe que há um aumento da penetração da turbulência na camada porosa com o aumento do número de Darcy. Além disso, os picos de energia cinética de turbulência estão localizados na interface entre o meio limpo e a camada porosa.

A Figura 6b evidencia o efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,095m$. Note que a penetração da turbulência para $Da_c=9,6876 \times 10^{-4}$ e $Da_c=1,0648 \times 10^{-3}$, são praticamente iguais, no entanto, pode-se constatar um aumento da penetração da turbulência no meio poroso com o aumento do número de Darcy.

Na Figura 6c foi mostrado o efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência, para $\phi_c=0,8429$ e $H_d=0,115m$. Observe que o aumento do número de Darcy implica num aumento da penetração da turbulência na região porosa, além disso, os picos de energia cinética turbulenta ocorrem na interface entre o meio limpo e o meio poroso.

Tabela 1: Propriedades do meio poroso homogêneo.

Caso	W [m]	H_d [m]	ϕ_c	$K_c \times 10^{-6}$ [m ²]	$Da_c \times 10^{-4}$	$K_c \times 10^{-6}$ [m ²]	$Da_c \times 10^{-4}$	$K_c \times 10^{-6}$ [m ²]	$Da_c \times 10^{-4}$	$K_c \times 10^{-6}$ [m ²]	$Da_c \times 10^{-4}$
				Haste Elíptica Transversal		Haste Quadrada		Haste Cilíndrica		Haste Elíptica Longitudinal	
150-30		0,075			5,6165		11,360		11,646		17,778
150-50	0,015	0,095	0,7382	3,1593	3,5006	6,3902	7,0806	6,5508	7,2585	10,000	11,080
150-70		0,115			2,3889		4,8319		4,9533		7,5614
250-30		0,075			8,7632		15,543		17,084		24,220
250-50	0,025	0,095	0,8429	4,9293	5,4618	8,7431	9,6876	9,6097	10,648	13,624	15,096
250-70		0,115			3,7273		6,6110		7,2663		10,302

Tabela 2: Características da região de interface.

Morfologia da haste	$\times 10^{-2}$ [m]		
	h_{mp}	e_i	h^*
Elíptica Transversal	4,35	1,25	1,2910
Quadrada	4,55	0,90	0,8862
Cilíndrica	4,50	1,00	1,0000
Elíptica Longitudinal	4,60	0,75	0,7746

Tabela 3: Características hidrodinâmicas do escoamento.

ϕ_c	H_d [m]	$Da_c \times 10^{-4}$	$Re_{H_d} \times 10^4$
0,7382	0,075	11,360	1,2013
		11,646	0,78387
		17,778	0,95979
	0,095	7,0806	2,6400
		7,2585	1,6340
		11,080	1,9341
	0,115	4,8319	4,5675
		4,9533	2,6940
		7,5614	3,2223
0,8429	0,075	8,7632	0,49425
		15,543	0,77509
		17,084	0,60463
		24,220	0,77438
	0,095	5,4618	1,1609
		9,6876	1,7812
		10,648	1,3298
		15,096	1,5980
	0,115	3,7273	2,0816
		6,6110	3,1759
		7,2663	2,3145
		10,302	2,7030

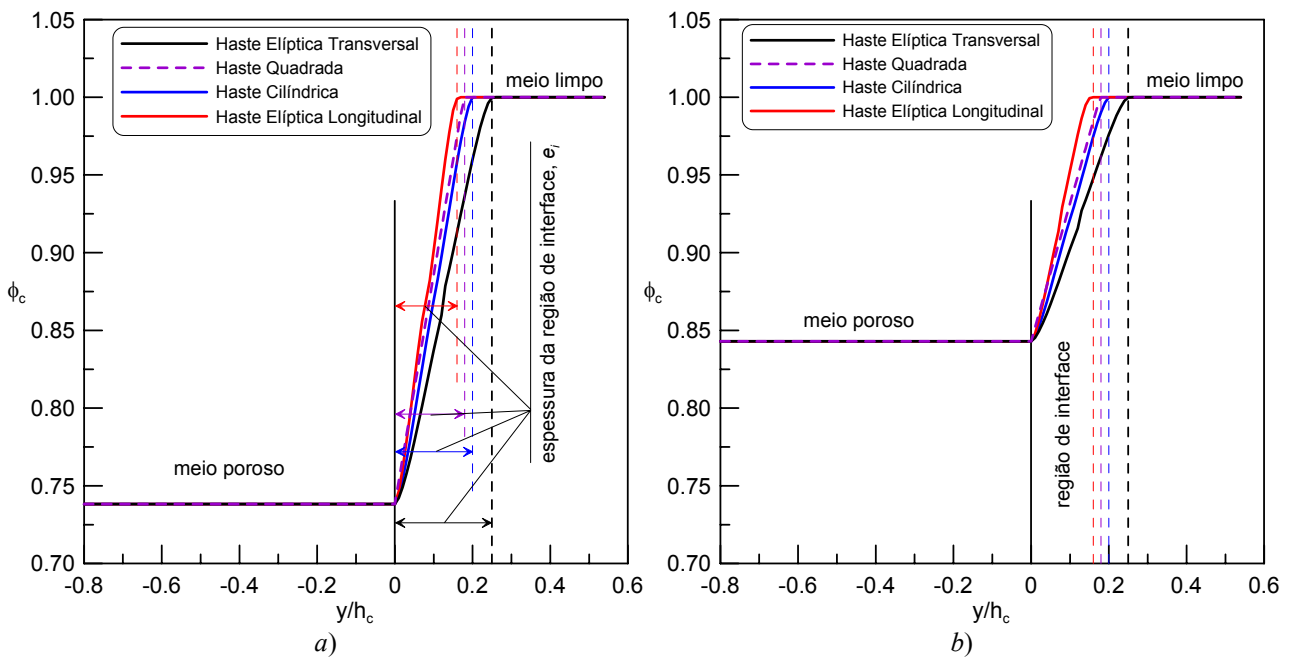


Figura 2: Perfil da porosidade ao longo da seção transversal do canal, para: a) $W=0,015m$, b) $W=0,025m$

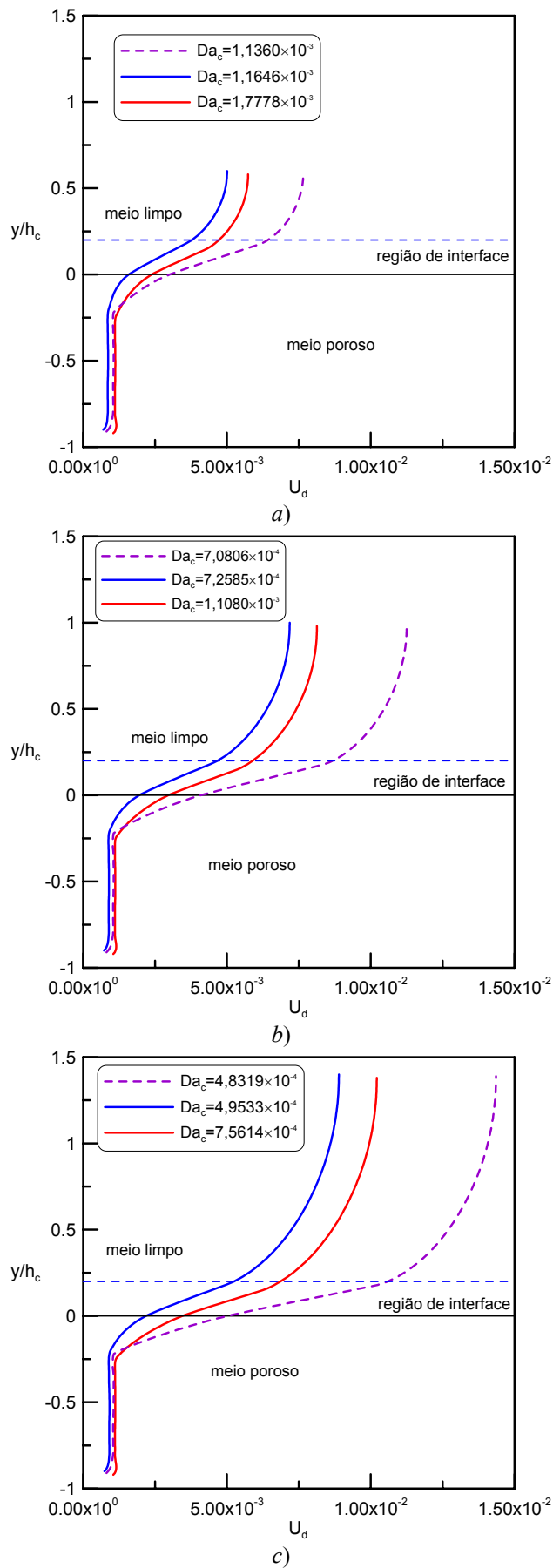


Figura 3: Efeito do número de Darcy no perfil de velocidade adimensional, $U_d = \mu u_D / h_c^2 (-\nabla \langle p \rangle^i)$, com $\phi_c = 0,7382$, para: a) $H_d = 0,075\text{m}$, b) $H_d = 0,095\text{m}$, c) $H_d = 0,115\text{m}$.

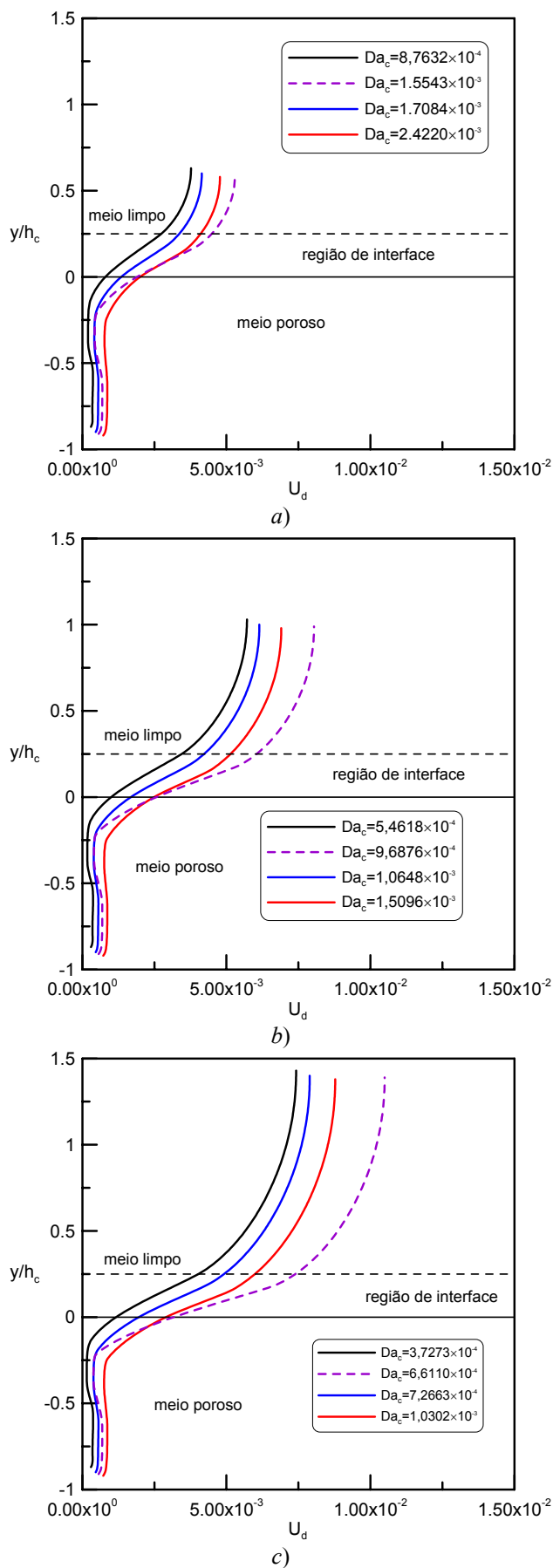


Figura 4: Efeito do número de Darcy no perfil de velocidade adimensional, $U_d = \mu u_D / h_c^2 (-\nabla \langle p \rangle^i)$, com $\phi_c = 0,8429$, para: a) $H_d = 0,075\text{m}$, b) $H_d = 0,095\text{m}$, c) $H_d = 0,115\text{m}$.

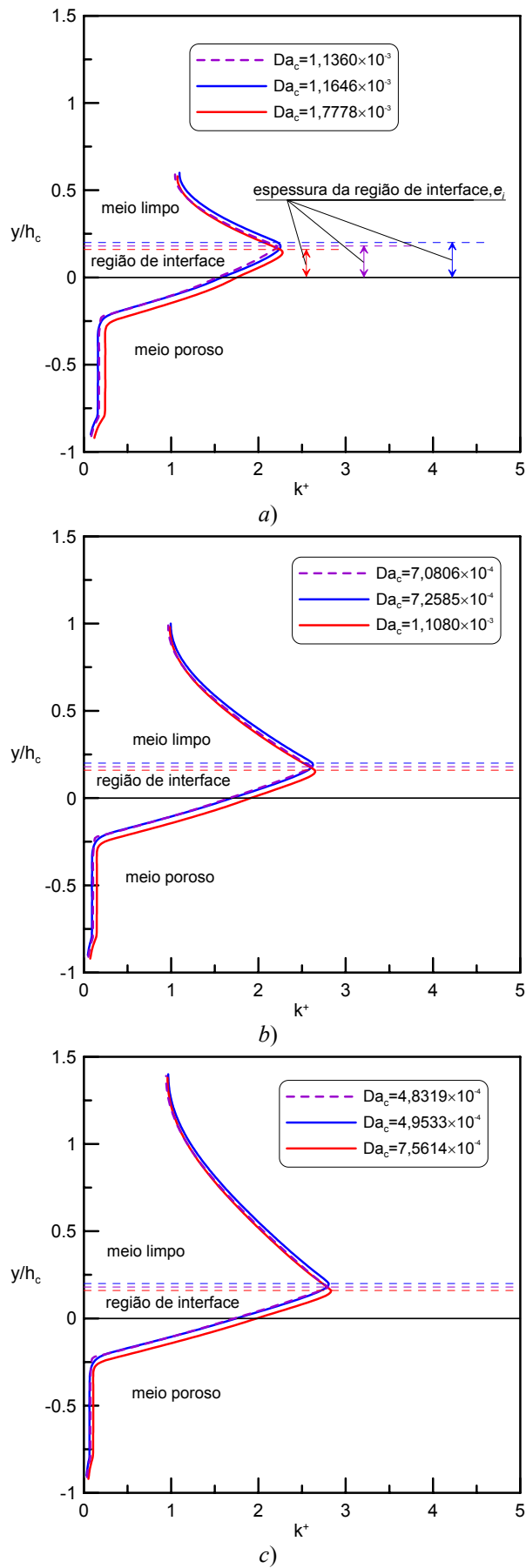


Figura 5: Efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência adimensional, $k^+ = k/[u^*]^2$, com $\phi_c = 0,7382$, para: a) $H_d = 0,075\text{m}$, b) $H_d = 0,095\text{m}$, c) $H_d = 0,115\text{m}$.

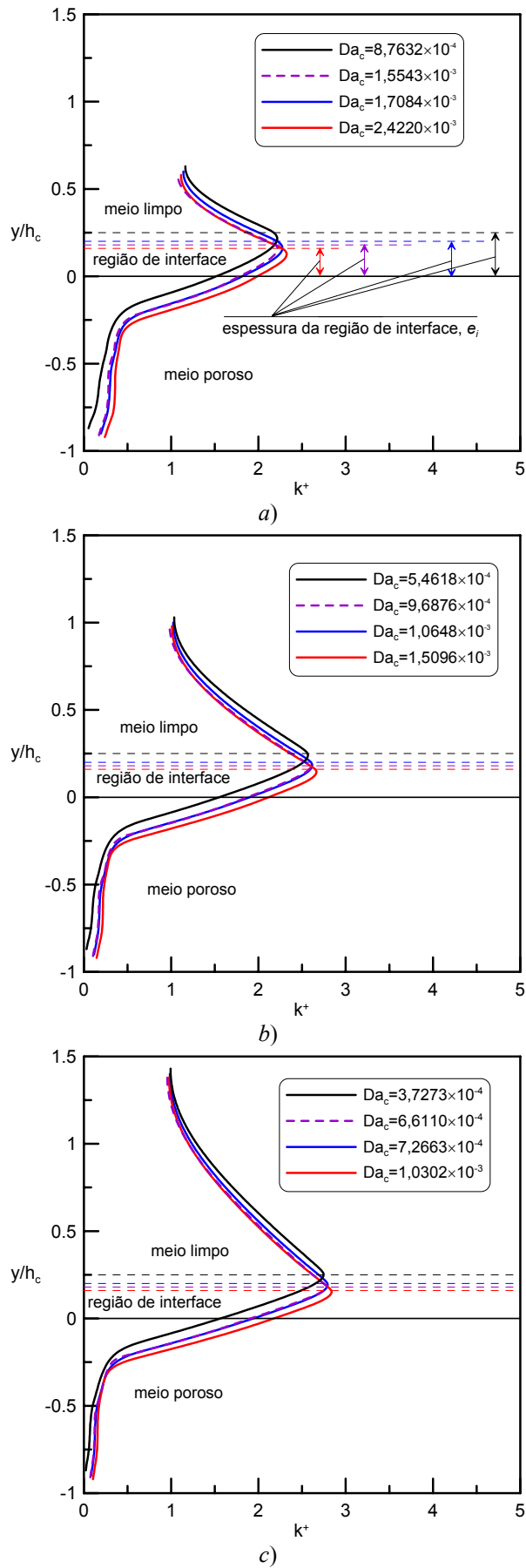


Figura 6: Efeito do número de Darcy no perfil de energia cinética de turbulência adimensional, $k^+ = k/[u^*]^2$, com $\phi_c = 0,8429$, para: a) $H_d = 0,075\text{m}$, b) $H_d = 0,095\text{m}$, c) $H_d = 0,115\text{m}$.

4. Conclusões

Os resultados mostram que no caso com $\phi_c=0,7382$, há uma vazão no canal maior do que a encontrada no caso com $\phi_c=0,8429$, para os mesmos valores de Darcy. Além disso, observa-se que o meio poroso formado de hastas quadradas exerce uma influência na vazão do canal que não é captada pela permeabilidade calculada segundo a lei de Darcy. Estes resultados são contrários aos resultados macroscópicos obtidos para escoamento laminar (vide Silva e de Lemos (2006)), sugerindo que o regime do escoamento deve ser contabilizado no cálculo da permeabilidade do meio poroso. Por outro lado, os perfis de energia cinética de turbulência apresentados mostram ser função das propriedades do meio poroso, uma vez que, quanto maior a porosidade, para valores de Darcy constante, ou quanto maior o valor de Darcy, para valores de porosidade constante, maior a penetração da turbulência na camada porosa. Além disso, o comportamento dos resultados distribuídos para escoamento turbulento encontrado em Silva e de Lemos (2005b) corrobora o comportamento dos resultados aqui apresentados, indicando que a metodologia de integração utilizada preserva a maioria das informações do escoamento distribuído.

5. Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq e à FAPESP pelo apoio financeiro durante o curso desta pesquisa.

6. Referências

- Breugem, W.P., 2004. "The influence of wall permeability on laminar and turbulent flow". 190f. Doctoral Thesis - Delft University of Technology, Nederland.
- Breugem, W.P., Boersma, B.J. and Uittenbogaard, R.E., 2004, "Direct Numerical Simulations of Plane Channel Flow Over a 3D Cartesian Grid of Cubes". Proceedings of the International Conference on Porous Media and Applications, (on CD-ROM), Évora, Portugal.
- Breugem, W.P., Boersma, B.J. and Uittenbogaard, R.E., 2005, "The Laminar Boundary Layer Over a Permeable Wall", *Transport in Porous Media*, Vol. 59, pp. 267-300.
- Breugem, W.P. and Boersma, B.J., 2005, "Direct Numerical Simulations of Turbulent Flow Over a Permeable Wall Using a Direct and a Continuum Approach", *Physics Fluids*, Vol. 17, N. 2.
- Darcy, H., 1856. "Les fontaines publiques de la ville de Dijon", Paris: Victor Dalmond.
- Kuwahara, F., Kameyama, Y., Yamashita, S., and Nakayama, A., 1998, "Numerical Modeling of Turbulent Flow in Porous Media Using a Spatially Periodic Array", *Journal of Porous Media*, Vol. 1, pp. 47-55.
- Kuznetsov, A.V. and Xiong, M., 2003, "Development of an Engineering Approach to Computations of Turbulent Flows in Composite Porous/Fluid Domains", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 42, pp. 913-919.
- Kuznetsov, A.V. and Becker, S.M., 2004, "Effect of the Interface Roughness on Turbulent Convective Heat Transfer in a Composite Porous/Fluid Duct", *International Communication of Heat and Mass Transfer*, Vol. 31, N. 1, pp. 11-20.
- Launder, B.E. and Sharma, B.I., 1974, "Application of the Energy-Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc", *Letters in Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 131-138.
- Ochoa-Tapia, J.A. and Whitaker, S., 1995a, "Momentum Transfer at the Boundary between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid - I", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 2635-2646.
- Ochoa-Tapia, J.A. and Whitaker, S., 1995b, "Momentum Transfer at the Boundary between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid - II", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 2647-2655.
- Pedras, M.H.J. and de Lemos, M.J.S., 2001a, "Macroscopic Turbulence Modelling for Incompressible Flow Through Undeformable Porous Media", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, N. 6, pp. 1081-1093.
- Pedras, M.H.J. and de Lemos, M.J.S., 2001b, "Simulation of Turbulent Flow in Porous Media Using a Spatially Periodic Array and a Low-Re Two-Equation Closure", *Numerical Heat Transfer - Part A - Applications*, Vol. 39, N. 1, pp. 35-59.
- Pedras, M.H.J. and de Lemos, M.J.S., 2001c, "On the Mathematical Description and Simulation of Turbulent Flow in a Porous Medium Formed by an Array of Elliptic Rods" *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 123, N. 4, pp. 941-947.
- Pedras, M.H.J. and de Lemos, M.J.S., 2003, "Computation of Turbulent Flow in Porous Media Using a Low-Reynolds $k-\epsilon$ Model an Infinite Array of Spatially Periodic Elliptic Rods", *Numerical Heat Transfer - Part A - Applications*, Vol. 43, N. 6, pp. 585-602.
- Prinos, P., Sofialidis, D. and Keramaris, E., 2003, "Turbulent Flow Over and Within a Porous Bed", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, N. 9, pp. 720-733.
- Silva, R.A. and de Lemos, M.J.S., 2003a, "Turbulent Flow in a Channel Occupied by a Porous Layer Considering the Stress Jump at the Interface", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 5113-5121.
- Silva, R.A. and de Lemos, M.J.S., 2003b, "Numerical Analysis of the Stress Jump Interface Condition for Laminar Flow over a Porous Layer", *Numerical Heat Transfer - Part A - Applications*, Vol. 43, pp. 603-617.
- Silva, R.A. and de Lemos, M.J.S., 2005a, "Effect of Medium Morphology on Laminar Flow in a Channel Partially Filled With a Porous Bed", *Proceedings of the 18th International Congress of Mechanical Engineering*, (on CD-ROM), Ouro Preto, MG, Brazil.

- Silva, R.A. e de Lemos, M.J.S., 2005b, “Efeito da Morfologia do Meio no Escoamento Turbulento em um Canal Parcialmente Preenchido com um Leito Poroso Formado por Hastes Cilíndricas e Elípticas”, Proceedings of 26th Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, (on CD-ROM), Guarapari, ES, Brazil.
- Silva, R.A. e de Lemos, M.J.S., 2006, “Escoamento Macroscópico Sobre um Leito Poroso Formado de Hastes Sólidas”, Proceedings of 27th Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Belém, PA, Brazil.

MACROSCOPIC TURBULENT FLOW IN A CHANNEL WITH A POROUS BED COMPOSED BY SOLID RODS

Renato A. Silva

Marcelo J.S. De-Lemos¹

Departamento de Energia – IEME

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA

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

¹ Corresponding author, delemos@ita.br.

Abstract: In this work the volume average concept is used to transport numerical results, which were obtained for a channel partially filled with solid rods, from the *microscopic* domain to a *macroscopic* domain. Through that methodology, values of permeability and porosity are calculated for the porous layer. Also, the effects of the Darcy number and porosity on the flow behavior are analyzed. Numerical results have shown the need of accounting the flow regime in the permeability evaluation. Moreover, the behavior of the results found in the available literature corroborates the behavior of the present results indicating, ultimately, that the integration methodology employed preserves most of the information of the flow.

Keywords: turbulent flow, volume averaged, porous medium, clear fluid, numerical method.