

# ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR TURBULENTO EM UMA CONTRAÇÃO ABRUPTA COM INSERTO POROSO USANDO MODELOS DE TURBULÊNCIA LINEAR E NÃO LINEAR

Marcelo Assato<sup>1</sup>

Marcelo J.S. De-Lemos<sup>2\*</sup>

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, <sup>1</sup>assato@aer.ita.br, <sup>2</sup>delemos@mec.ita.br

**Resumo.** Este artigo apresenta resultados do escoamento turbulento e transferência de calor por convecção forçada num canal com contração abrupta contendo um inserto poroso na passagem do escoamento. O canal tem uma taxa de contração 3:2. Resultados para o meio híbrido (limpo e poroso) foram obtidos usando os modelos de turbulência macroscópicos  $k$ - $\epsilon$  linear e não linear. Parâmetros do inserto poroso como a porosidade, permeabilidade, espessura e altura foram variados afim de analisar seus efeitos sobre o campo aerodinâmico e térmico. Resultados da transferência de calor e coeficiente de fricção na parede inferior aquecida do canal obtidos pelos dois modelos de turbulência foram comparados, bem como as linhas de corrente e as diferentes perdas de carga devido ao material poroso. As comparações foram feitas considerando os casos sem e com inserto poroso de espessura  $a/H=0.083, 0.166$  e  $0.250$ , onde  $H$  é a altura do degrau. A porosidade do material poroso foi variada entre  $0.85$  e  $0.95$  com permeabilidade na faixa de  $10^{-6}$ - $10^{-2}$   $m^2$ . Duas alturas do inserto poroso foram estudadas  $h/H=1.0$  e  $h/H=2.0$ .

**Palavras chave:** transferência de calor, escoamento turbulento, inserto poroso, contração abrupta, modelagem de turbulência.

## 1. Introdução

O escoamento de fluidos e a transferência de calor por convecção forçada em configurações híbridas (limpo e meio poroso) tem sido investigados experimentalmente e numericamente em diversos trabalhos. A inserção de um material poroso em um canal pode melhorar a troca de calor e evitar regiões de recirculação indesejáveis, bem como também ajudar na uniformização do escoamento em locais à sua jusante. No entanto, além do inserto poroso aumentar o coeficiente de transferência de calor, a queda de pressão é também expressivamente aumentada. Assim, dependendo de certos parâmetros, tais como a geometria, porosidade e permeabilidade do material poroso, a taxa de aumento da queda de pressão pode ser muito maior que do coeficiente de transferência de calor. Logo, os parâmetros devem ser analisados e considerados nos projetos de equipamentos termo-mecânicos.

Transferência de calor por convecção forçada laminar ou turbulenta em meios porosos tem muitas aplicações práticas tais como no processamento de petróleo, combustão em matrizes porosas, filtros, trocadores de calor, resfriamento de equipamentos eletrônicos, dispersão e contaminantes no solo, e outros.

Mais recentemente, alguns problemas tais como escoamento num canal com expansão abrupta com insertos porosos tem sido estudado numericamente por Rocamora & de Lemos (2000), Chan et al. (2000), Assato et al. (2002) e Assato & de Lemos (2003). Os dois primeiros trabalhos apresentaram resultados para o escoamento laminar e turbulento com transferência de calor convectiva forçada. Eles usaram o modelo de viscosidade turbulência  $k$ - $\epsilon$  com função de parede clássica para ambas regiões limpa e porosa. Rocamora & de Lemos (2000) trataram a interface entre o meio poroso e meio de fluido seguindo o trabalho de Ochoa-Tapia & Whitaker (1995). Chan et al. (2000) consideraram o escoamento na interface entre os meios limpo e poroso como sendo contínuo. A presença da extensão do modelo de Brinkman (Brinkman (1948)) na equação do meio poroso elimina a necessidade de impor uma condição de interface explícita, de acordo com Nield & Bejan (1992). Assato et al. (2002) and Assato & de Lemos (2003) apresentaram resultados para o escoamento turbulento usando os modelos macroscópico de viscosidade turbulenta linear e não linear. Eles mostraram que dependendo dos parâmetros do inserto poroso é possível desaparecer completamente com a bolha de recirculação.

No presente trabalho, resultados numéricos para o escoamento turbulento e transferência de calor em um canal com contração abrupta com um inserto poroso é apresentado. Dois modelos de turbulência (linea e não linear) são usados. Aqui, as condições na interface meio poroso e meio limpo são os mesmos usados por Rocamora & de Lemos (2000), Assato et al. (2002) and Assato & de Lemos (2003).

Os modelos de viscosidade turbulenta não linear que representam uma extensão dos modelos lineares clássicos tem mostrado bom desempenho em escoamentos limpos onde as tensões normais de Reynolds desempenham um importante papel (Assato & de Lemos (2000)) corrigindo as deficiências apresentadas pelos modelos lineares (isotrópicos), principalmente na predição de regiões de recirculação (acentuada curvatura das linhas de corrente).

Portanto, neste artigo comparações dos resultados simulados com os modelos de turbulência k-ε linear e não linear para o escoamento turbulento não isotérmico através de um canal com contração abrupta contendo um inserto poroso são mostrados. Alguns importantes parâmetros do inserto poroso tais como a espessura, a altura, a porosidade e a permeabilidade são variados e seus efeitos sobre os campos do escoamento e térmico são avaliados.

## 2. Equações de Transporte Macroscópico

Os trabalhos de Pedras and de Lemos 2001<sup>a,b,c</sup> apresentam as equações de transporte macroscópico usados neste estudo. Elas foram derivadas para um fluido incompressível em um meio poroso saturado, homogêneo e rígido, e para um regime de escoamento turbulento são obtidos através de aplicações de operadores media no tempo e volume, com a ajuda de teoremas de média volumétrica local e dupla decomposição. O sistema de equações é composto pelas equações da continuidade, momento, energia, energia cinética turbulenta, taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, tensor de Reynolds e térmico, e viscosidade turbulenta.

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

$$\left[ \nabla \cdot \left( \rho \frac{\bar{\mathbf{u}}_D \bar{\mathbf{u}}_D}{\phi} \right) \right] = -\nabla(\phi \langle \bar{p} \rangle^i) + \mu \nabla^2 \bar{\mathbf{u}}_D + \nabla \cdot (-\rho \phi \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{\mathbf{u}}' \rangle^i) - \left[ \frac{\mu \phi}{K} \bar{\mathbf{u}}_D + \frac{c_F \phi \rho |\bar{\mathbf{u}}_D| \bar{\mathbf{u}}_D}{\sqrt{K}} \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} (\rho c_p)_f \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_D \langle \bar{T} \rangle^i) = \nabla \cdot \left\{ [k_f \phi + k_s (1 - \phi)] \nabla \langle \bar{T} \rangle^i \right\} + \nabla \cdot \left[ \frac{l}{\Delta V_{A_i}} \int_{A_i} \mathbf{n} (k_f \bar{T}_f - k_s \bar{T}_s) dS \right] \\ - (\rho c_p)_f \nabla \cdot \left[ \phi \left( \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{T}_f \rangle^i + \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{T}_s \rangle^i \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\rho \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_D \langle k \rangle^i) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t_0}}{\sigma_k} \right) \nabla (\phi \langle k \rangle^i) \right] - \rho \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{\mathbf{u}}' \rangle^i : \nabla \bar{\mathbf{u}}_D + c_k \rho \frac{\phi \langle k \rangle^i |\bar{\mathbf{u}}_D|}{\sqrt{K}} - \rho \phi \langle \varepsilon \rangle^i \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \rho \nabla \cdot (\bar{\mathbf{u}}_D \langle \varepsilon \rangle^i) = \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t_0}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla (\phi \langle \varepsilon \rangle^i) \right] + c_{1\varepsilon} (-\rho \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{\mathbf{u}}' \rangle^i : \nabla \bar{\mathbf{u}}_D) \frac{\langle \varepsilon \rangle^i}{\langle k \rangle^i} \\ + c_{2\varepsilon} c_k \rho \frac{\phi \varepsilon |\bar{\mathbf{u}}_D|}{\sqrt{K}} - c_{2\varepsilon} f_\varepsilon \rho \phi \frac{\langle \varepsilon \rangle^i}{\langle k \rangle^i} \end{aligned} \quad (5)$$

$$-\rho \phi \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{\mathbf{u}}' \rangle^i = \mu_{t_0} \langle \bar{\mathbf{D}} \rangle^v - \frac{2}{3} \phi \rho \langle k \rangle^i \mathbf{I} \quad (6)$$

$$-(\rho c_p)_f \langle \bar{\mathbf{u}}' \bar{T}_f \rangle^i = c_{p_f} \frac{\mu_{t_0}}{\sigma_{T_0}} \nabla \langle \bar{T} \rangle^i \quad (7)$$

$$\mu_{t_0} = \rho c_\mu f_\mu \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i}, \quad (8)$$

onde  $T_f$  e  $T_s$  são as temperaturas do fluido e do sólido, respectivamente,  $k_f$  e  $k_s$  representam as condutividades térmica. Além disso, o modelo homogêneo assume  $\langle T_s \rangle^i = \langle T_f \rangle^i = \langle T \rangle^i$ .

É importante enfatizar que na equação da energia macroscópica (3), o segundo (*tortuosidade*) e o terceiro (*dispersão*) mecanismos do lado direito foram desprezados. Estes termos são importantes somente dentro do material poroso e, no presente caso, o volume ocupado pelo inserto poroso é pequeno comparado ao todo domínio computacional de interesse. Um esquema da geometria em estudo é mostrado na Fig. 1. Também, é importante observar que um único sistema de equações governantes macroscópico (1)-(5) é usado em todo o domínio da Fig. 1. Para a região do escoamento limpo (fora do inserto poroso,  $\phi=1$ ,  $K \rightarrow \infty$ ) equações para o escoamento turbulento não obstruído são obtidos.

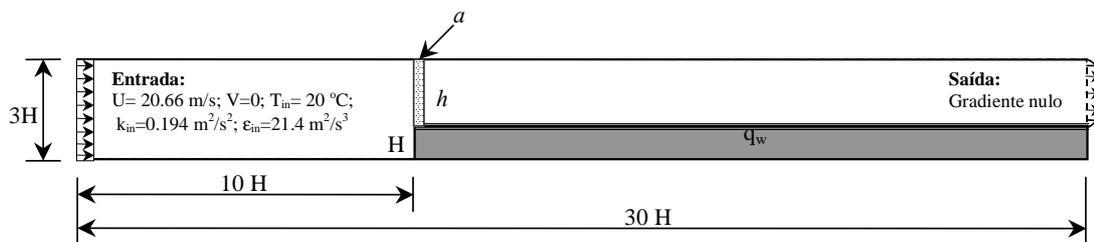


Figura 1 – Canal com contração abrupta (3:2) com inserto poroso de espessura  $a$  e altura  $h$ .

## 2.1. Tensão de Reynolds não linear macroscópico

Neste trabalho, resultados produzidos pelos modelos de viscosidade turbulenta não lineares são investigados. O modelo de turbulência não linear macroscópico aqui proposto é constituído pelo mesmo sistema de equações formalmente dado por Pedras & de Lemos (2001a). A única diferença entre ambos modelos macroscópicos (Linear e Não Linear) está na expressão da tensão de Reynolds macroscópica, mantendo a segunda ordem, esta nova equação da taxa de tensão-deformação não linear macroscópica pode ser re-escrita na forma:

$$\begin{aligned}
 -\rho\varphi\langle u'_i u'_j \rangle^i &= \left( \mu_{i\varphi} \langle \bar{D}_{ij} \rangle^v \right)^B - \left( c_{1NL} \mu_{i\varphi} \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \left[ \langle \bar{D}_{ik} \rangle^v \langle \bar{D}_{kj} \rangle^v - \frac{1}{3} \langle \bar{D}_{kl} \rangle^v \langle \bar{D}_{li} \rangle^v \delta_{ij} \right] \right)^{NL1} \\
 &- \left( c_{2NL} \mu_{i\varphi} \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \left[ \langle \bar{Q}_{ik} \rangle^v \langle \bar{S}_{kj} \rangle^v + \langle \bar{Q}_{jk} \rangle^v \langle \bar{S}_{ki} \rangle^v \right] \right)^{NL2} \\
 &- \left( c_{3NL} \mu_{i\varphi} \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \left[ \langle \bar{Q}_{ik} \rangle^v \langle \bar{Q}_{jk} \rangle^v - \frac{1}{3} \langle \bar{Q}_{lk} \rangle^v \langle \bar{Q}_{li} \rangle^v \delta_{ij} \right] \right)^{NL3}
 \end{aligned} \quad (9)$$

onde  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker; os sobrescritos ( $L$  e  $NL$ ) na equação (9) indicam contribuições **L**inear e **N**on-**L**inear,  $\mu_{i\varphi}$  é a viscosidade turbulenta macroscópica,  $\langle \bar{D}_{ij} \rangle^v$  e  $\langle \bar{Q}_{ij} \rangle^v$  são os tensores de deformação e vorticidade, escritos na forma indicial, respectivamente, como:

$$\langle \bar{D}_{ij} \rangle^v = \left( \frac{\partial \bar{u}_{iD}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_{jD}}{\partial x_i} \right), \quad \langle \bar{Q}_{ij} \rangle^v = \left( \frac{\partial \bar{u}_{iD}}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_{jD}}{\partial x_i} \right). \quad (10)$$

Neste trabalho o modelo não linear proposto por Shih et al (1993) foi usado e tem as seguintes expressões:

$$c_\mu = \frac{2/3}{1.25 + s + 0.9\Omega}, \quad c_{1NL} = \frac{0.75}{c_\mu(1000 + s^3)}, \quad c_{2NL} = \frac{3.8}{c_\mu(1000 + s^3)}, \quad c_{3NL} = \frac{4.8}{c_\mu(1000 + s^3)},$$

$$\text{onde, } s = \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \sqrt{\frac{1}{2} \langle \bar{D}_{ij} \rangle^v \langle \bar{D}_{ij} \rangle^v} \quad \text{e} \quad \Omega = \frac{\langle k \rangle^i}{\langle \varepsilon \rangle^i} \sqrt{\frac{1}{2} \langle \bar{Q}_{ij} \rangle^v \langle \bar{Q}_{ij} \rangle^v} \quad (11)$$

Note que a equação (6) é recuperada se as constantes  $c_{1NL}$ ,  $c_{2NL}$  e  $c_{3NL}$  na equação (9) são assumidas nulas.

## 3. Modelo Numérico

As equações governantes para simular o escoamento turbulento e transferência de calor por convecção forçada dentro de uma configuração híbrida foram discretizadas usando o método dos volumes finitos, (Patankar (1980)), aplicados a um sistema de coordenadas generalizadas. Funções de parede clássicas foram empregadas para descrever o escoamento turbulento próximo à parede. O processo de cálculo começa com a solução das duas equações de momento. A seguir, o campo de velocidade é ajustado afim de satisfazer o princípio da continuidade. Este ajuste é obtido pela

solução da equação de correção da pressão (algoritmo SIMPLE). Depois disso, as equações do modelo de turbulência e de energia são resolvidas e relaxadas para atualizar os campos de  $k$ ,  $\varepsilon$  e temperatura.

### 3. Resultados e Discussão

A geometria sob consideração é mostrada na Fig. 1. Para esta geometria a altura do degrau,  $H$ , foi assumido como 0.1 m. Os resultados foram obtidos considerando um número de Reynolds de entrada de  $Re=132000$  baseado na altura do degrau. As condições de contorno de entrada estão ilustradas na Fig. 1. Uma malha ortogonal de tamanho  $360 \times 60$  foi usada. Resultados preliminares para o escoamento sem obstrução porosa foram obtidos afim de avaliar o desempenho dos modelos de turbulência linear e não linear no domínio limpo. Parâmetros numéricos para estes casos foram  $a/H=0$ ,  $c_F=0$ ,  $\phi=1$  e  $K \rightarrow \infty$ . O fluido de trabalho é o ar ( $\rho=1.15 \text{ kg/m}^3$ ,  $\mu=1.8 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ ,  $Pr=0.72$ ,  $c_{pf}=1006.0 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ) com uma temperatura uniforme de entrada de  $T_{in}=20^\circ\text{C}$ . As condições de contorno para o campo térmico são fluxo de calor constante ( $q_w=3000 \text{ W/m}^2$ ) sobre a parede do degrau, e  $q_w=0$  sobre as demais superfícies do degrau e canal.

Nas seguintes figuras, o efeito da espessura, altura, porosidade, e permeabilidade do inserto poroso sobre os campos aerodinâmico e térmico serão mostrados, para o escoamento turbulento, usando os modelos Linear (L\_HRN) e Não Linear (NL\_HRN). Primeiramente, as linhas de corrente são analisadas com o material poroso colocado sobre o degrau com as seguintes espessuras:  $a=0.083H$ ,  $a=0.166H$  e  $a=0.250H$ , onde  $H$  é a altura do degrau. A altura do inserto poroso foi variada de  $h=H$  e  $h=2H$ . As figuras 2-6 mostram comparações das linhas de correntes entre os modelos linear e não linear considerando as seguintes permeabilidades e porosidades: Fig. 2)  $K=10^{-6} \text{ m}^2$ ,  $\phi=0.85$ ; Fig. 3)  $K=10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $\phi=0.85$ ; Fig. 4)  $K=10^{-2} \text{ m}^2$ ,  $\phi=0.85$ ; Fig. 5)  $K=10^{-4} \text{ m}^2$ ,  $\phi=0.95$  and Fig. 6)  $K=10^{-2} \text{ m}^2$ ,  $\phi=0.95$ . Pode ser notado que para as permeabilidades  $K=10^{-6} \text{ m}^2$  e  $K=10^{-4} \text{ m}^2$  a bolha de recirculação é praticamente amortecida, independentemente do modelo de turbulência e valores das porosidade, espessuras e alturas investigados. Para  $K=10^{-6} \text{ m}^2$  e  $h=H$  o campo de velocidade aparece distorcido após o inserto poroso, com uma maior velocidade na parte superior do canal. O inserto funciona quase como se fosse um obstáculo sólido deslocando o escoamento para cima. Para  $K=10^{-2} \text{ m}^2$  a bolha de recirculação não é desfeita e seu tamanho simulado pelo modelo linear, em todos os casos, é menor que os calculados pela teoria não linear. Das figuras pode observar que a permeabilidade do inserto poroso tem um efeito mais pronunciado no amortecimento da bolha que outros parâmetros como a espessura ou porosidade. Também é mostrado que é possível desaparecer com a região de recirculação usando a altura do inserto poroso de  $h=H$ , apesar de distorcer o campo de velocidade após o obstáculo poroso.

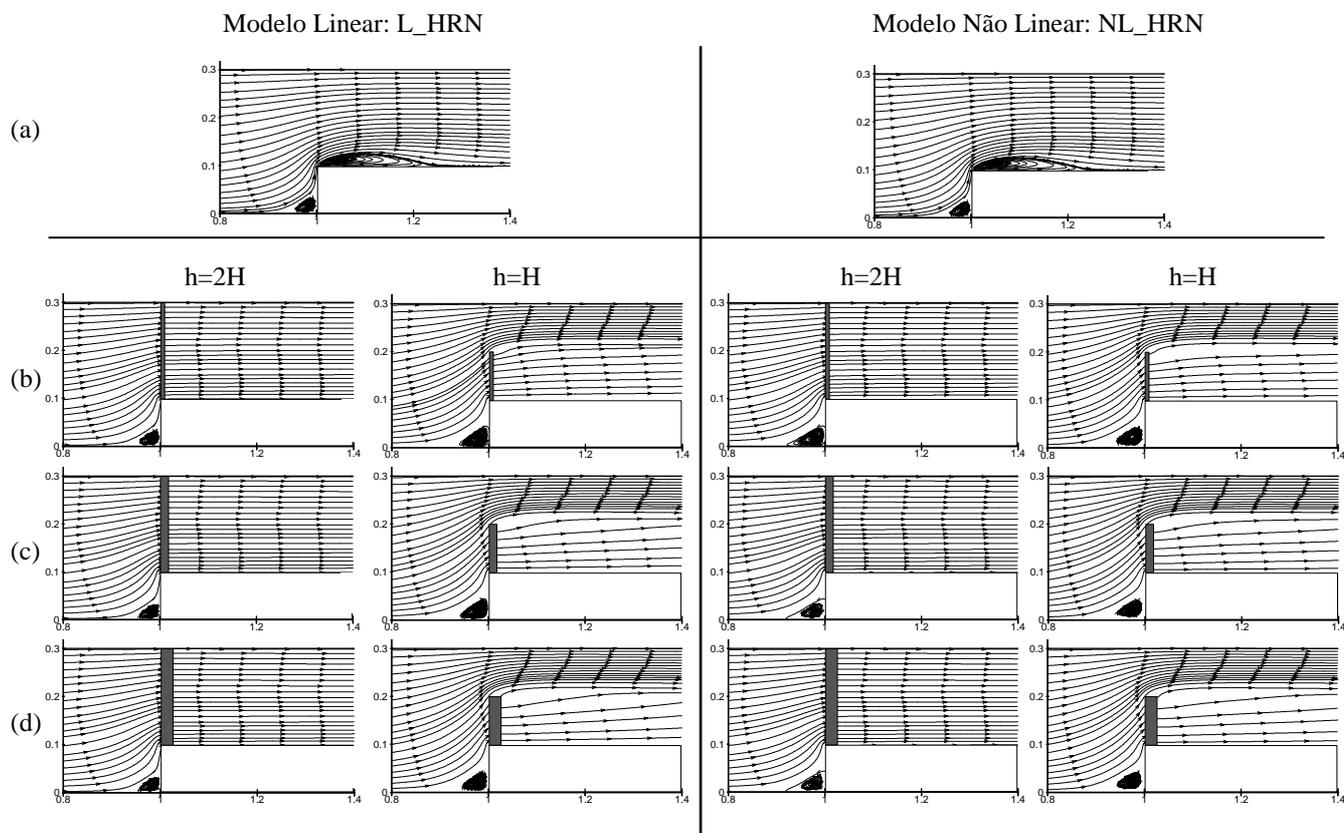


Figura 2. Comparação das linhas de corrente entre os modelos linear e não linear para o inserto poroso com  $K=10^{-6} \text{ m}^2$  e  $\phi=0.85$  e altura de  $h=2H$  ou  $h=H$ : (a)  $a=0$ ; (b)  $a=0.083H$ ; (c)  $a=0.166H$ ; (d)  $a=0.250H$

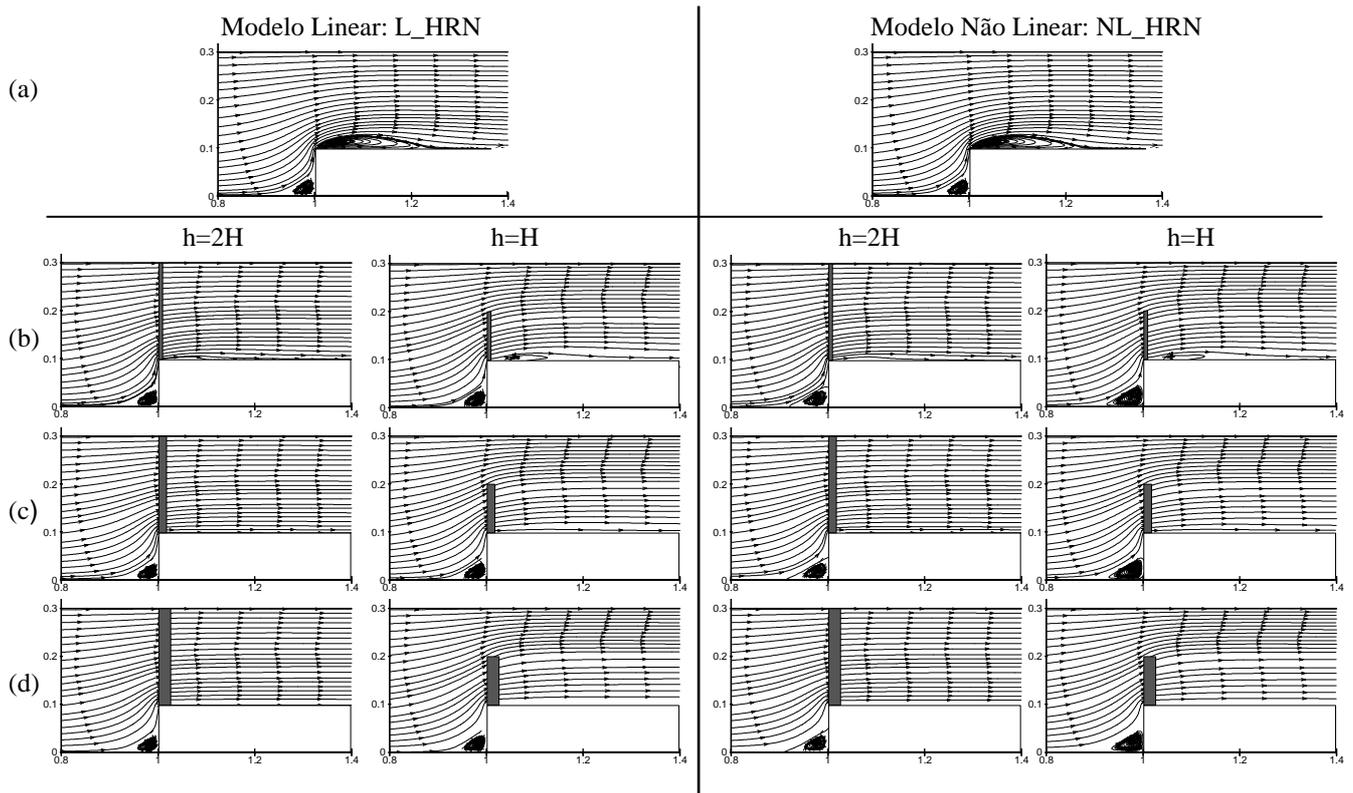


Figura 3. Comparação das linhas de corrente entre os modelos linear e não linear para o inserto poroso com  $K=10^{-4} \text{ m}^2$  e  $\phi = 0.85$  e altura de  $h=2H$  ou  $h=H$ : (a)  $a=0$ ; (b)  $a=0.083H$ ; (c)  $a=0.166H$ ; (d)  $a=0.250H$

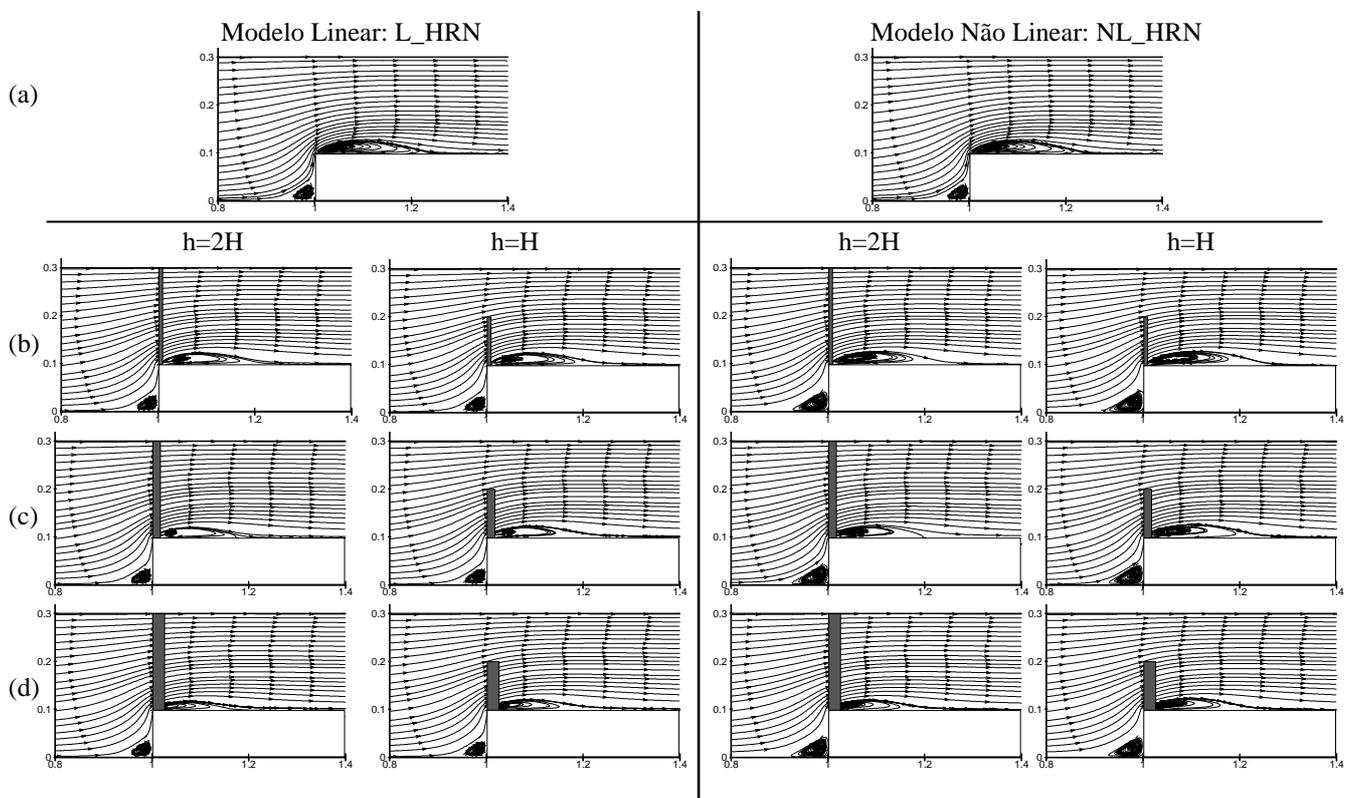


Figura 4. Comparação das linhas de corrente entre os modelos linear e não linear para o inserto poroso com  $K=10^{-2} \text{ m}^2$  e  $\phi = 0.85$  e altura de  $h=2H$  ou  $h=H$ : (a)  $a=0$ ; (b)  $a=0.083H$ ; (c)  $a=0.166H$ ; (d)  $a=0.250H$

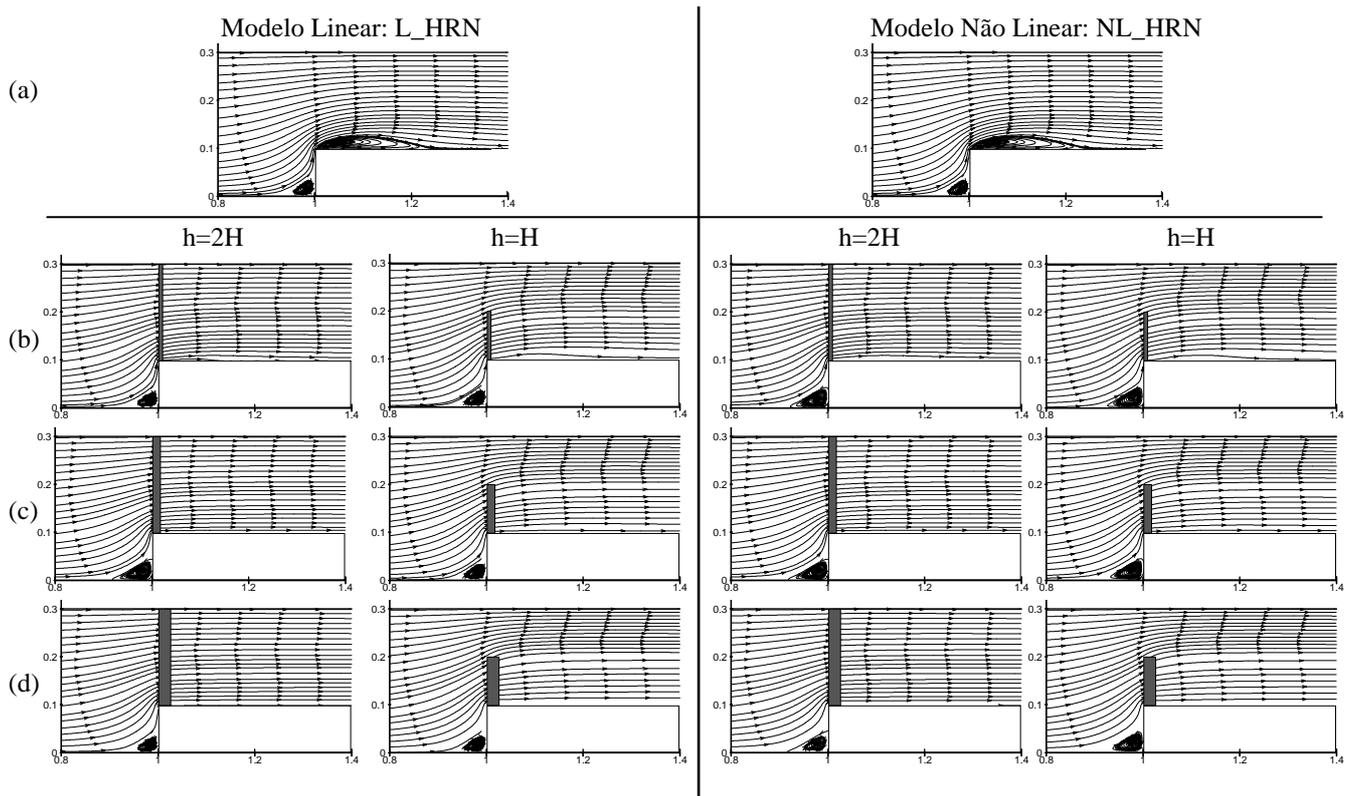


Figura 5. Comparação das linhas de corrente entre os modelos linear e não linear para o inserto poroso com  $K=10^{-4} \text{ m}^2$  e  $\phi = 0.95$  e altura de  $h=2H$  ou  $h=H$ : (a)  $a=0$ ; (b)  $a=0.083H$ ; (c)  $a=0.166H$ ; (d)  $a=0.250H$

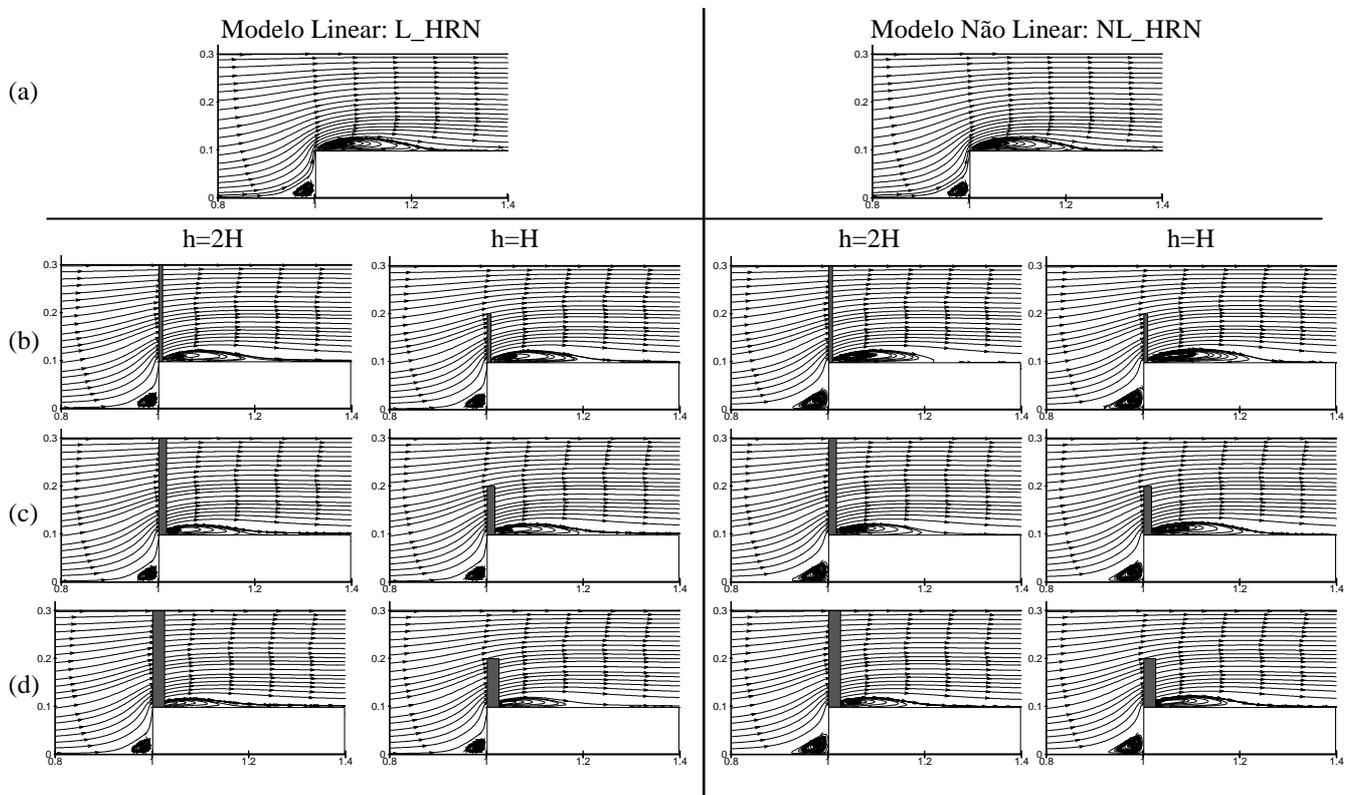


Figura 6. Comparação das linhas de corrente entre os modelos linear e não linear para o inserto poroso com  $K=10^{-2} \text{ m}^2$  e  $\phi = 0.95$  e altura de  $h=2H$  ou  $h=H$ : (a)  $a=0$ ; (b)  $a=0.083H$ ; (c)  $a=0.166H$ ; (d)  $a=0.250H$

A Tab. 1 mostra os resultados para a queda de pressão no canal com e sem o material poroso e considerando as alturas  $h=H$  e  $h=2H$  simulados pelos modelos de turbulência linear e não linear. Estas quantidades foram obtidas como:

$$\overline{\Delta p} = \frac{I}{A_t} \int_{A_t} (p_{in} - p_{ex}) dy, \quad (12)$$

onde os subscritos *in* e *ex* referem-se a entrada e saída do canal, respectivamente.

Os resultados apresentados na Tab. 1 mostram um expressivo ganho na queda de pressão,  $\overline{\Delta p}$ , para o canal com o inserto poroso quanto comparado com o canal limpo. A queda de pressão é mais pronunciada à medida que diminui-se a permeabilidade e aumenta-se a espessura do material poroso. Reduzindo a altura do inserto poroso pela metade é possível obter uma expressiva redução na perda de pressão, principalmente para os insertos porosos com permeabilidade de  $K=10^{-6}$  e  $10^{-4} m^2$ .

Tabela 1. Queda de pressão no canal com inserto poroso.

Modelos de turbulência	Espessura $a [m]$	Porosidade $\phi$	Permeabilidade $K [m^2]$	Queda de pressão para $h=H$ $\overline{\Delta p} [N/m^2]$	Queda de pressão para $h=2H$ $\overline{\Delta p} [N/m^2]$
L_HRN	0	-	-	485.87	485.87
	0.0083	0.85	$10^{-2}$	570.84	620.50
			$10^{-4}$	941.39	1413.44
			$10^{-6}$	1705.69	6892.93
		0.95	$10^{-2}$	556.94	600.86
			$10^{-4}$	950.39	1418.72
			$10^{-6}$	1896.63	12019.61
	0.0163	0.85	$10^{-2}$	602.46	681.70
			$10^{-4}$	1089.71	1922.22
			$10^{-6}$	1896.63	12019.61
		0.95	$10^{-2}$	587.81	658.27
			$10^{-4}$	1107.27	1924.42
			$10^{-6}$	2012.97	17104.30
	0.0250	0.85	$10^{-2}$	628.01	735.08
			$10^{-4}$	1194.38	2426.36
			$10^{-6}$	2012.97	17104.30
0.95		$10^{-2}$	616.01	709.79	
		$10^{-4}$	1218.58	2428.54	
		$10^{-6}$	2154.78	17196.32	
NL_HRN	0	-	-	486.91	486.91
	0.0083	0.85	$10^{-2}$	571.68	621.34
			$10^{-4}$	951.46	1422.06
			$10^{-6}$	1899.77	6952.29
		0.95	$10^{-2}$	557.63	601.38
			$10^{-4}$	954.69	1420.50
			$10^{-6}$	1899.77	6952.29
	0.0163	0.85	$10^{-2}$	603.77	682.65
			$10^{-4}$	1112.23	1933.78
			$10^{-6}$	2032.43	12103.35
		0.95	$10^{-2}$	588.62	659.56
			$10^{-4}$	1120.61	1927.44
			$10^{-6}$	2154.78	17196.32
	0.0250	0.85	$10^{-2}$	629.99	737.89
			$10^{-4}$	1233.33	2440.07
			$10^{-6}$	2154.78	17196.32
0.95		$10^{-2}$	617.12	709.91	
		$10^{-4}$	1248.65	2432.63	
		$10^{-6}$	2154.78	17196.32	

As figuras 7 e 8 mostram as distribuições para o coeficiente de fricção,  $C_f$  e para o número de Stanton,  $St$ , ao longo da superfície aquecida do degrau, respectivamente usando os modelos linear e não linear. Estes coeficientes são dados por:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\rho U_0^2 / 2}, \quad St = \frac{q_w}{\rho c_{pf} U_0 (T_w - T_{in})} \quad (13)$$

Novamente nota-se o efeito expressivo da permeabilidade do inserto poroso. Os resultados da distribuição do coeficiente de fricção ( $C_f$ ) e do número de Stanton ( $St$ ) indicam que a permeabilidade do inserto poroso desempenha um papel importante na mudança final do escoamento e transferência de calor ao invés da porosidade ou espessura do material. No entanto, uma diminuição da permeabilidade do material resulta em um expressivo ganho na perda de pressão, como observado na Tab. 1. Tem sido observado que usando a menor espessura,  $a=0.083H$ , é obtido os menores picos de  $St$ , além de introduzir menor queda de pressão. Para uma outra espessura não é vantagem usar insertos porosos, porque os picos de  $St$  tornam-se mais intensos que para o canal limpo. Um repentino aumento de  $St$  em torno do ponto de recolagem, quase sempre é indesejável em muitas situações práticas e desta forma pode ser evitado colocando um adequado material poroso. Assim, apesar da resistência ao escoamento produzido pelo inserto poroso, no qual introduz uma significativa perda de pressão nas localidades à jusante (veja Tab. 1) requerendo um aumento na potência de bombeamento para manter a velocidade do escoamento, o desaparecimento da bolha de recirculação diminui o risco de um super-aquecimento em volta do ponto de recolagem. Estes artifícios podem trazer importantes vantagens para os engenheiros projetistas na otimização dos equipamentos termo-mecânicos. Agora, analisando o efeito da altura do inserto poroso observa-se uma pequena mudança da distribuição de  $C_f$  e  $St$  para a permeabilidade de  $K=10^{-2} m^2$ , porém, para a permeabilidade de  $K=10^{-4} m^2$  uma significativa diminuição dos picos de  $St$  é obtida para a  $h=H$ . Além de diminuir os picos de  $St$ , a altura  $h=H$  tem como principal vantagem a diminuição da perda de pressão no canal.

#### 4. Conclusões e Comentários

Neste trabalho, os modelos linear e não linear usando funções de parede foram usados para simular a transferência de calor por convecção forçada em um canal com contração abrupta. Um material poroso foi colocado na passagem do escoamento turbulento e alguns parâmetros como a porosidade  $\phi$ , permeabilidade  $K$ , espessura  $a$  e altura  $h$  do inserto poroso foram variados afim de analisar seus efeitos sobre o escoamento a jusante do obstáculo poroso.

As figuras 2-6 mostraram que a bolha de recirculação na configuração sem inserto poroso foi praticamente amortecida usando os insertos porosos com permeabilidades de  $K=10^{-6} m^2$  e  $K=10^{-4} m^2$ . Para  $K=10^{-2} m^2$  a bolha de recirculação não desapareceu e o seu tamanho simulado pelo modelo linear sempre foi menor que os calculados pelo modelo de turbulência não linear. Para a permeabilidade  $K=10^{-6} m^2$  e altura  $h=2H$  foi obtido perfis de velocidade bastante uniforme após o inserto, e usando uma altura  $h=H$  o campo de velocidade apresenta distorcido, e sofre um grande desvio para a região superior do canal. Dependendo do interesse do projeto de equipamentos termo-mecânicos, talvez seja interessante direcionar o escoamento para a região superior do canal, para evitar o superaquecimento de algum dispositivo sujeitos à alta temperatura, por exemplo, e desta forma o inserto poroso com esses parâmetros poderá ser selecionado.

Os modelos linear e não linear sempre apresentaram resultados bem próximos, a principal diferença aparece somente nas regiões de recirculação do escoamento, onde os modelos não lineares apresentam melhores resultados conforme mostrados nos trabalhos de Assato & de Lemos (2000). Nas zonas de recirculação, onde encontram-se as acentuadas curvatura das linhas de corrente, as tensões de Reynolds normais desempenham um importante papel, e possuem as expressões melhores ajustadas (anisotrópicas) dadas pelos modelos não lineares.

As distribuições de  $St$  e  $C_f$  mostraram indiferentes aos modelos de turbulência usado, ou seja, ambos modelos linear e não linear produzem resultados bem concordantes. É importante enfatizar que se o interesse é amortecer completamente a bolha de recirculação, a menor espessura  $a=0.083H$  com  $h=H$  e  $K=10^{-4} m^2$  produz os menores picos de  $St$  sem aumentar excessivamente a perda de carga no canal.

#### 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP e ao CNPq, Brasil, pelo suporte financeiro durante a preparação deste trabalho.

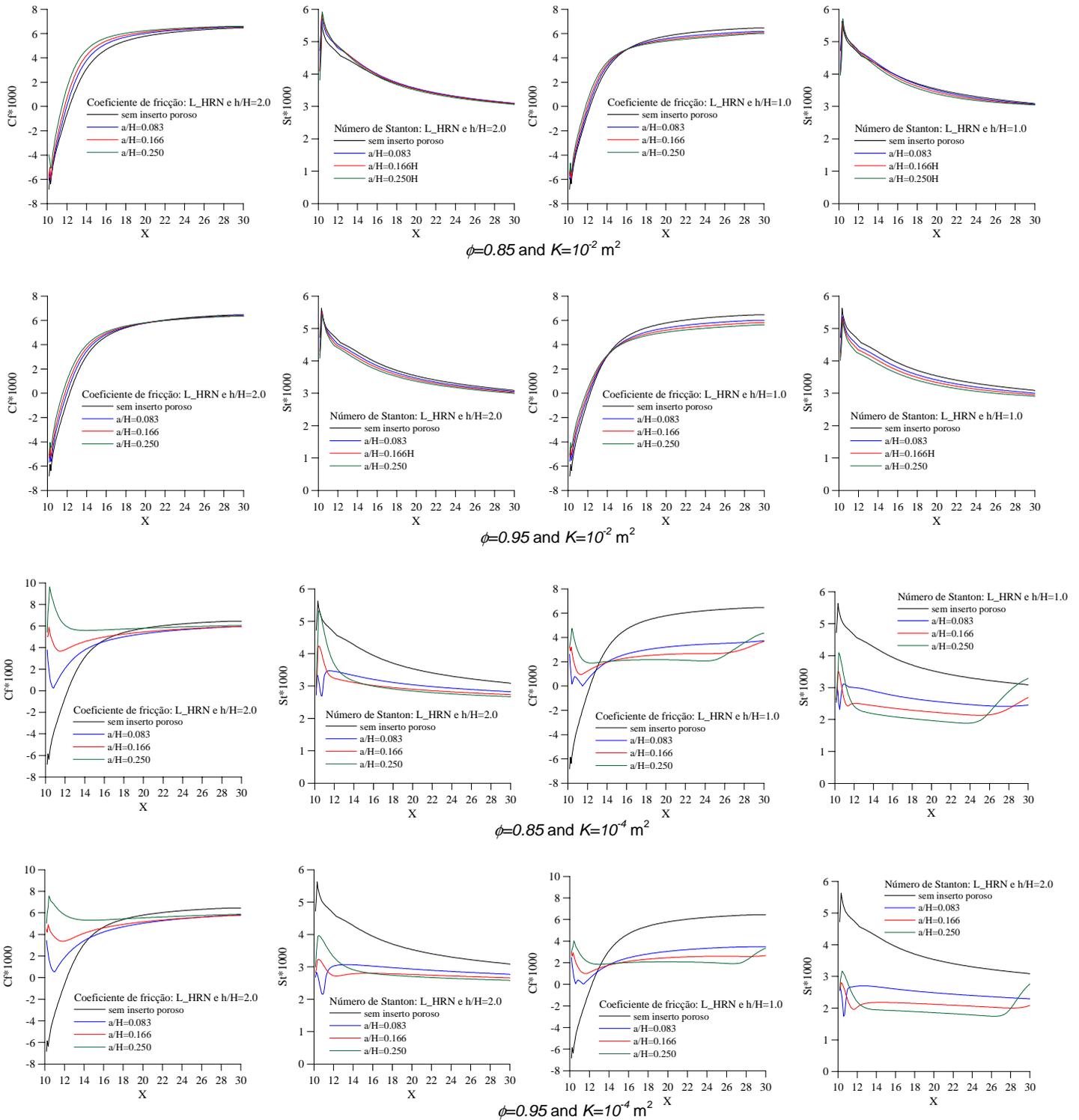


Figura 7. Distribuição do coeficiente de fricção e número de Stanton usando o modelo Linear – L\_HRN para as alturas do inserto poroso  $h=1.0H$  e  $h=2.0H$ .

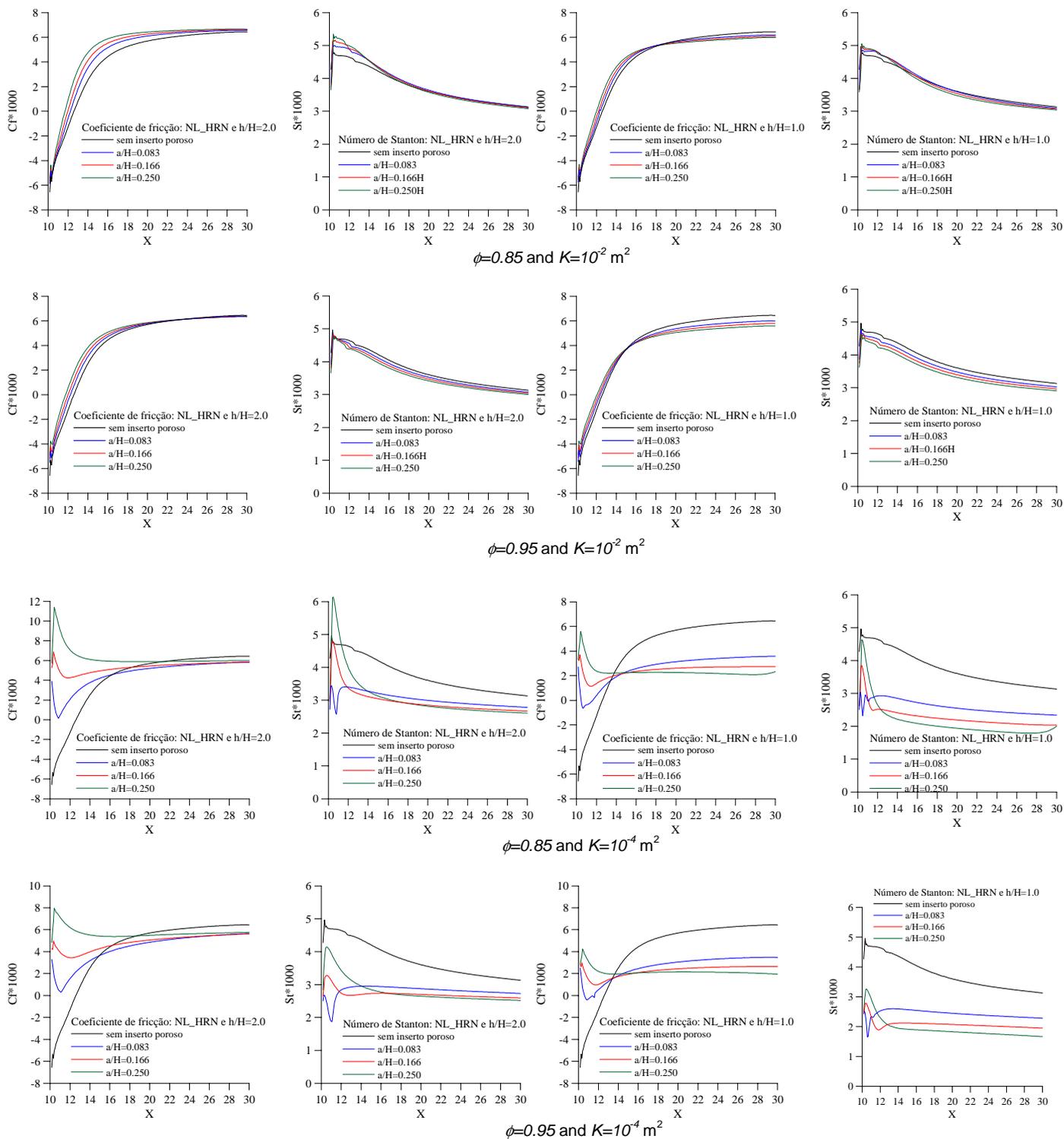


Figura 8. Distribuição do coeficiente de fricção e número de Stanton usando o modelo Não Linear – NL\_HRN para as alturas do inserto poroso  $h=1.0H$  e  $h=2.0H$ .

## 6. Referências

- Assato, M. and de Lemos, M.J.S., 2000, "Tratamento Numérico e Aplicações de um Modelo de Viscosidade Turbulenta Não Linear para Alto e Baixo Reynolds", 2<sup>th</sup> ETT- Escola Brasileira de Primavera Transição e Turbulência, Uberlândia/MG, Brazil, Dez. 11-15.
- Assato, M., Pedras, M.H.J. & de Lemos, M.J.S., 2002, "Numerical Solution of Turbulent Flow Past a Backward-Facing-Step With a Porous Insert Using Linear and Non-Linear k-epsilon Models", Proc. of APM2002 - 1st Inter. Conf. on Applications of Porous Media, Paper APM-163, V. CDROM, Eds. R. Bennacer and A.A. Mohamed, 2002. v.1. p.539 – 550, June 2-8, Jerba, Tunisia.
- Assato, M. & de Lemos, M. J. S., 2003, "Heat Transfer in a Back-step Flow Past a Porous Insert using a Non-Linear Turbulence Model and a Low Reynolds Wall Treatment", In: 3<sup>rd</sup> International Conference on Computational Heat and Mass Transfer, Banff, Canada, May 26-30, Proc. 3rdICCHMT, University of Calgary.
- Brinkman, H.C., 1948, "Calculations of the Flow of Heterogeneous Mixture Through Porous Media" Applied Science Research, 2, pp. 81-86.
- Chan, E.C., Lien, F.S. and Yovanovich, M.M., 2000, "Macroscopic Numerical Study of Forced Convective Heat Transfer in a Back-step Channel Through Porous Layer", Proceedings of NTHC2000, ASME National Heat Transfer Conference, 20<sup>th</sup> –22<sup>th</sup> Aug., 2000, Pittsburgh, PA, USA.
- de Lemos, M.J.S. and Pedras, M.H.J., 2001, "Recent Mathematical Models for Turbulent Flow in Saturated Rigid Porous Media". ASME Journal of Fluids Engineering, vol. 123 (4), pp. 935-940.
- Nield, D.A. and Bejan, A., 1992, "Convective in Porous Media", Springer-Verlag.
- Ochoa-Tapia, J. A.; Whitaker, S., 1995, "Momentum Transfer at the Boundary between a Porous Medium and a Homogeneous Fluid-I. Theoretical Development.", Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 38, pp. 2635-2646.
- Patankar, S. V., 1980, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere, New York.
- Pedras, M. H. J. and de Lemos, M.J.S., 2001, "Macroscopic Turbulence Modeling for Incompressible Flow Through Undeformable Porous Media". Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 44 (6), pp. 1081-1093.
- 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.
- Pedras, M. H. J. and de Lemos, M. J. S., 2001, "On Mathematical Description and Simulation of Turbulent Flow in a Porous Medium Formed by an Array of Elliptic Rods". J. Fluids Engineering, vol. 123 (4), pp. 941-947.
- Rocamora, Jr., F.D. and de Lemos, M.J.S., 2000, "Heat Transfer in Suddenly Expanded Flow in a Channel with Porous Inserts", Proceedings of NTHC2000, ASME National Heat Transfer Conference, 20<sup>th</sup> –22<sup>th</sup> August, 2000, Pittsburgh, Pennsylvania, USA.
- Shih, T.H., Zhu, J. and Lumley, J.L., 1993, "A Realizable Reynolds Stress Algebraic Equation Model", NASA TM-105993.

### HEAT TRANSFER PAST A CONTRACTION IN A DUCT WITH A POROUS INSERT USING LINEAR AND NONLINEAR TURBULENCE MODELS

Marcelo Assato<sup>1</sup>

Marcelo J.S. De-Lemos<sup>2\*</sup>

Departamento de Energia – IEME

Divisão de Engenharia Aeronáutica e Mecânica

Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA

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

\* Corresponding author, <sup>1</sup>assato@aer.ita.br, <sup>2</sup>delemos@mec.ita.br

#### Abstract

This work presents a numerical investigation for the turbulent flow and heat transfer in a sudden contraction channel with a porous material placed in a flow passage. The channel has a contraction rate of 3:2. Results for the hybrid medium were obtained using linear and non-linear k-ε macroscopic models. It was used an inlet Reynolds number of Re=132000 based on the height of the step. Parameters such as porosity, permeability, thickness and height of the porous insert were varied in order to analyze their effects on the flow pattern. The results of local heat transfer, friction coefficient and stream lines obtained by the two turbulence models were compared for the cases without and with porous insertion of thickness  $a/H=0.083$ ,  $0.166$  and  $0.250$ , where  $H$  is the step height. Insert porosity was varied between  $0.85$  and  $0.95$  with permeability in the range  $10^{-6}$ - $10^{-2} m^2$ . Also, two height of the porous obstruction were studied  $h/H=1.0$  and  $h/H=2.0$ .

Keywords: heat transfer, turbulent flow, porous insert, sudden contraction, turbulent modelling