

## SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO ESCOAMENTO LAMINAR EM UM CANAL COMPLEXO

Jalusa Maria da Silva Ferrari  
Jhon Nero Vaz Goulart

Universidade de Brasília- UnB  
Grupo de Mecânica Experimental e Computacional – GMEC

Endereço: Área Especial de Indústria Projeção A, UNB - DF-480 - Gama Leste, Brasília - DF, 72444-240

**RESUMO:** Este trabalho simula numericamente a perda de carga e o coeficiente de atrito médio em canais compostos utilizando o pacote ANSYS® CFX. Foram avaliados 03 tipos de canais retangulares de altura  $H$  e largura  $W$  com um canal secundário ao longo de uma das paredes laterais. As dimensões do canal secundário são sua profundidade  $P$  e largura  $D$ . As simulações foram feitas para um escoamento laminar e incompressível para uma faixa de Reynolds de 200 a 1200, baseado no diâmetro-hidráulico,  $D_H$ , na velocidade média do canal,  $U_m$ , e na viscosidade cinemática do fluido,  $\nu$ . Os resultados mostraram que o coeficiente médio de atrito é função de um fator de forma  $C$  e inversamente proporcional ao número de Reynolds. A utilização do diâmetro-hidráulico como escala de comprimento para o cálculo do fator médio de atrito levou a uma dispersão dos resultados que foram melhor aproximados utilizando raiz quadrada da área da seção transversal do canal,  $\sqrt{A}$ . Soluções transientes também foram avaliadas para observar instabilidades comuns nesse tipo de canal. Somente o canal de maior área de slot mostrou flutuações periódicas de velocidade, caso C4.

**Palavras-Chave:** perda de carga, fator de atrito, canais compostos, instabilidades laminares.

**ABSTRACT:** This paper investigates through numerical simulations the pressure drop and of the coefficient of friction on compound channels using ANSYS® CFX. Simulations were carried out in three rectangular channels of height  $H$  and width  $W$  with a secondary channel on one side. The secondary channel was characterized by its width  $D$  and depth  $P$ . The simulations were performed for an incompressible laminar flow whose Reynolds numbers were calculated from 200 up to 1200, based on the hydraulic-diameter,  $D_h$ , on the main velocity of the channel,  $U_m$ , and kinematic viscosity of the fluid,  $\nu$ . The findings indicated that the mean friction factor is given as a function of a geometry coefficient,  $C$  and proportional to the inverse of Reynolds number. The hydraulic diameter as length-scale to compute the mean friction factor led to some scattering of the data, that was smoothed by using the square root of the channel's cross-section area,  $\sqrt{A}$ . Time-dependent solutions were also carried out. The outcomes showed laminar instabilities that could be observed only for the biggest slot case C4.

**Keywords:** pressure drop, friction factor, compound channels, laminar instabilities.

**RESUMEN:** Este trabajo simula numéricamente la pérdida de carga y el coeficiente medio de fricción en canales compuestos utilizando el software ANSYS® CFX. Fueron evaluadas 03 tipos de canales

rectangulares de altura  $H$  e ancho  $W$  con un canal secundario a lo largo de una de las paredes laterales. Las dimensiones del canal secundario son su profundidad  $P$  y ancho  $D$ . Las simulaciones fueron hechas para un flujo laminar e incompresible para una faja de Reynolds de 200 a 1200, basado en el diámetro hidráulico,  $D_h$ , en la velocidad media del canal,  $U_m$ , y en la viscosidad cinemática del fluido,  $\nu$ . Los resultados mostraron que el coeficiente medio de fricción es función de un factor de forma  $C$  e inversamente proporcional al número de Reynolds. La utilización de diámetro hidráulico como longitud de la escala para el cálculo del factor medio de fricción llevo a una dispersión de los resultados que fueron aproximados mejor usando la raíz cuadrada del área de la sección transversal del canal,  $\sqrt{A}$ . Soluciones transitorias también fueron evaluadas para observar inestabilidades comunes en ese tipo de canal. Solamente el canal de mayor área de slot mostro fluctuaciones periódicas de velocidad, caso C4.

**Palabras Clave:** perdida de carga, coeficiente de fricción, canales compuestos, inestabilidades laminares.

## 1 - Introdução

Canais compostos são caracterizados pela presença de um canal principal, por onde o escoamento se desenvolve com certa facilidade, conectado a uma ou mais fendas onde há predominância dos efeitos viscosos. Canais como esse são largamente utilizados no interior de reatores nucleares, trocadores de calor, canais de abastecimento e até em sistemas de resfriamento de conjuntos eletrônicos (Meyer e Rehme, 1995, Soldini *et al.*, 2004, Souza *et al.*, 2015). Nessas aplicações o escoamento é, muitas vezes, obrigado a escoar em canais não circulares, assim a necessidade de determinação de fatores de atrito é fundamental para o cálculo de potência requeridas para sistemas de bombeamento.

A forma como a geometria interfere sobre a perda de carga e o fator de atrito nesse tipo de escoamento tem sido objeto de estudo entre vários autores. Bahrami *et al.* (2006) desenvolveram soluções analíticas para calcular a perda de carga e o fator de atrito em canais não circulares sem subcanal. Os autores utilizaram a raiz quadrada da área da seção transversal como escala de comprimento em suas formulações. Anos antes, os autores Muzychka e Yovanovich (1998) também formularam equações analíticas para o cálculo do fator de forma em canais de seção arbitrária não composta. Ambas formulações, de 1998 e 2006, os autores admitiram escoamento laminar, incompressível e completamente desenvolvido.

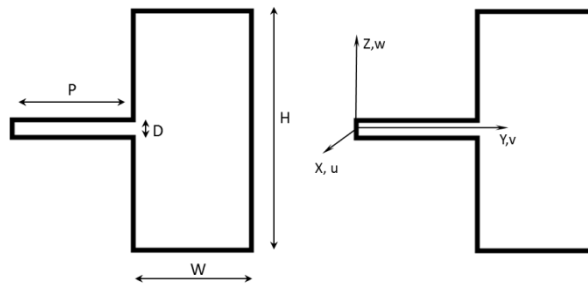
Além de caracterizar a perda de carga e do fator de atrito em canais compostos, ainda é importante, e também desejável, o conhecimento da dinâmica do escoamento nesses canais. Uma das mais notórias e desafiantes características de escoamentos em canais compostos é o aparecimento de estruturas coerentes de grande escala (Goulart *et al.* 2013, Meyer e Rehme 1995, Meyer, 2009). A descrição e predição do aparecimento dessas estruturas é indispensável para evitar problemas de vórtices que provocam vibrações e para quantificar corretamente os processos de mistura que acontecem na região da fenda (Rehme, 1992).

Nesse trabalho, o escoamento laminar é simulado em um canal retangular acoplado lateralmente a um pequeno subcanal. Os subcanais são retangulares e possuem dimensões de 30 x 4, 10 x 4 e 30 x 12 mm. O canal principal é mantido fixo, medindo 30 x 60 mm. Nas simulações estacionárias o principal objetivo é a determinação do fator de atrito médio do canal composto. As simulações transientes têm por finalidade a visualização e descrição de estruturas coerentes na região da fenda. O escoamento é considerado completamente desenvolvido, laminar, incompressível e compreende Reynolds de 200 a 1200. O número de Reynolds foi baseado no diâmetro-hidráulico,  $D_H$ , na velocidade média do canal,  $U_m$ , e na viscosidade cinemática do fluido,  $\nu$ .

## 2 - METODOLOGIA

### 2.1 - Domínio computacional e Malha

A seção de testes é apresentada na Figura 1. O canal principal é retangular, possuindo largura  $W$  e altura  $H$ , mantidas fixas durante todas as simulações e valendo, respectivamente, 30 e 60 mm. Ao longo de uma das paredes laterais existe um subcanal secundário de dimensões  $P$  e  $D$ , profundidade e largura, respectivamente. O comprimento do canal, para todos os casos, foi de 504 mm,  $L/D_H = 10$  para o maior subcanal 30 x 12 mm.



**Figura 1.** Vista esquemática da seção transversal.

Foram feitas simulações para diferentes valores de  $P$  e  $D$ , nomeados como casos C2, C3 e C4. Os números de Reynolds, baseados no diâmetro-hidráulico,  $D_H$ , na velocidade média do canal e na viscosidade cinemática, variam de 200 a 1200. O número de Reynolds foi controlado pela variação do fluxo mássico. Para todos os casos estudados, a massa específica e a viscosidade permaneceram constantes. Nas paredes, condições de não deslizamento foram impostas. Para obtenção do escoamento completamente desenvolvido, uma condição de periodicidade translacional foi aplicada na direção principal do escoamento (eixo  $x$ ), através da prescrição do fluxo mássico.

A geometria foi subdividida em volumes hexaédricos de forma que a malha pudesse construída por hexaedros. Na Tabela 1 estão dispostos os detalhes de espaçamento na malha e a distância do primeiro ponto com relação a parede do canal ou subcanal. A distância entre o primeiro ponto e a parede, para o canal e subcanal, são indicadas por  $\Delta y_{pcan}$  e  $\Delta y_{slot}$ , respectivamente. Na direção do eixo  $z$ , essa dimensão é dada por  $\Delta z_{pcan}$ , para o canal principal, e por  $\Delta z_{slot}$ , para o canal secundário. A dimensão máxima entre as células no canal principal são indicadas por  $\Delta z_{maxcan}$  na direção  $z$  e  $\Delta y_{maxcan}$  na direção  $y$ .

**Tabela 1.** Detalhes da malha para os casos investigados

Caso	P x D (mm)	$\Delta x$ (mm)	$\Delta z_{pcan}$ (mm)	$\Delta y_{pcan}$ (mm)	$\Delta z_{maxcan}$ (mm)	$\Delta y_{maxcan}$ (mm)	$\Delta z_{slot}$ (mm)	$\Delta y_{slot}$ (mm)
C1	-	8,40	0,36	0,30	1,80	1,50	-	-
C2	30,00 x 4,00	8,40	0,36	0,30	1,80	1,50	0,09	0,30

C3	10,00 x 4,00	8,40	0,36	0,30	1,80	1,50	0,08	0,08
C4	30,00 x 12,00	8,40	0,36	0,30	1,80	1,50	0,08	0,30

Para todos os casos foi determinado um erro máximo de  $10^{-6}$  para as equações de conservação de massa e balanço de quantidade de movimento. Soluções transientes foram realizadas nos canais C2, C3 e C4 para os maiores números de Reynolds baseados nos seus diâmetros-hidráulicos, 1200. O passo de tempo para as simulações foi tal que o número de Courant ( $Co$ ) máximo não excedeu 1. No caso do canal C4, onde instabilidades laminares apareceram, o passo de tempo  $\Delta t = 5 \times 10^{-4}$ s para atender o critério de  $Co \leq 1$ . Foram simulados 14 tempos convectivos,  $T_c = L/U_m$ .

Em consequência dos modelos matemáticos encontrados para canais de seção transversal não circular apresentarem soluções apenas para geometrias regulares (Gunnasegaran *et al.*, 2009, Bahrami *et al.*, 2006), decidiu-se simular o canal C1 para observar se os resultados obtidos seriam aproximados aos propostos. É visto adiante que os resultados para o canal C1 atingiram resultados satisfatórios.

Testes de independência de malha foram feitos para o canal C4 para o maior número de Reynolds. As simulações feitas utilizando 1.534.812 nós.

### 3 - Equações governantes

Para escoamento laminar e incompressível as equações de balanço de massa e quantidade de movimento são dadas por

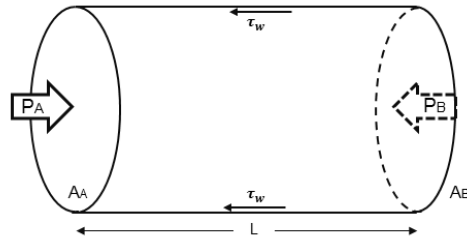
$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial (u_i u_i)}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial^2 x_j}$$

Para um escoamento incompressível e completamente desenvolvido em um canal de área de seção transversal  $A$  e comprimento  $L$ , as equações de Navier-Stokes, Eq. (1), transforma-se em uma equação de Poisson,

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial^2 y} \quad (2)$$

Nessa equação as forças viscosas são completamente balanceadas pelo gradiente de pressão. Nesse tipo de escoamento, a perda de carga se dá ao longo da tubulação e é considerada constante para um escoamento incompressível, estacionário e completamente desenvolvido. A Figura 2 mostra o balanço dessas forças para um pedaço da tubulação onde as hipóteses acima são verificadas.



**Figura 2.** Balanço de forças em um duto para escoamento completamente desenvolvido.

Onde  $P_A$  e  $P_B$ , são as pressões na entrada e saída do volume de controle (tubulação), respectivamente, e  $A_A$  e  $A_B$  são as respectivas áreas de saída.  $P_r$  é o perímetro da seção,  $L$  a distância entre entrada e saída e  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento agindo na parede. O balanço de forças pode ser então equacionado como segue

$$P_A A_A = P_B A_B + \tau_w P_r L \quad (3)$$

Não havendo modificação nas áreas de entrada e saída da seção transversal e introduzindo o conceito de diâmetro-hidráulico ( $D_H = 4A/P$ ), a tensão de cisalhamento média na parede do canal pode ser facilmente calculada como

$$\begin{aligned} \tau_w &= \frac{(P_A - P_B) A}{L P_r} \\ \tau_w &= \frac{(P_A - P_B) D_H}{L 4} \end{aligned} \quad (4)$$

Sabendo que a tensão cisalhante é proporcional à massa específica do fluido,  $\rho$ , ao quadrado da velocidade média do escoamento no canal,  $U_m$ , e um fator de atrito,  $f$ , então

$$\tau_w = f \frac{\rho U_m^2}{2} \quad (5)$$

Dessa forma, através do gradiente de pressão, da velocidade média e das características geométricas do canal o fator médio de atrito,  $f$ , pode ser calculado. Para dutos circulares sob as hipóteses de escoamento laminar e completamente desenvolvido o fator de atrito  $f$  é dado por

$$f = C \text{Re}_{Dh}^{-1} \quad (6)$$

Onde  $\text{Re}_{Dh}$  é o número de Reynolds do escoamento e é dado pelas relações de grandezas do escoamento e de propriedades do fluido.

$$\text{Re}_{Dh} = \frac{\rho U_m D_h}{\mu} \quad (7)$$

$D_h$  é o diâmetro da tubulação e  $\rho$  e  $\mu$  são a massa específica do fluido e sua viscosidade dinâmica.

O parâmetro  $C$  é uma valor de forma e depende da geometria da seção transversal do canal. Para dutos de seção circular a solução analítica, Eq. (2), é dada por  $C = 16$ , conforme Fanning (ou 64, segundo Darcy-Weisbach).

Em canais não-circulares é possível obter soluções matemáticas fechadas, ainda que de difícil trato. Sharma e Müller (2006), sugerem o cálculo do coeficiente de forma,  $C$ , para canais retangulares, através da Eq. (8), visto que a solução clássica,  $C = 16$  para tubos circulares, é discrepante para dutos não-circulares (Baharami, 2006). A solução de uma equação de 5º grau leva em conta um coeficiente geométrico do canal,  $\alpha$ ,

$$f Re_{Dh} = 24(1 - 1,3553\alpha + 1,9467\alpha^2 - 1,7012\alpha^3 + 0,9564\alpha^4 - 0,2537\alpha^5) \quad (8)$$

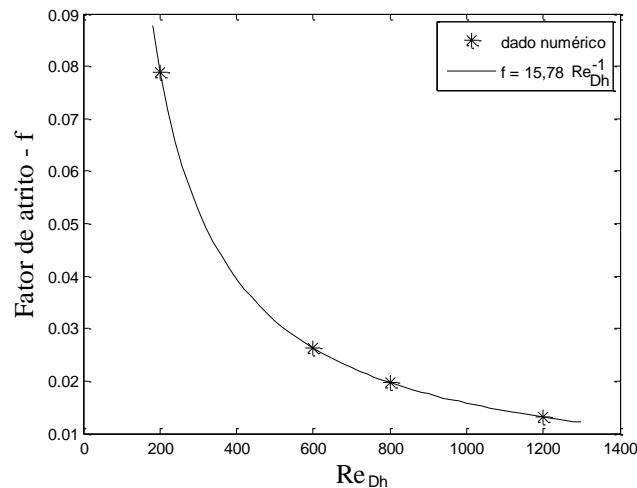
$\alpha$  é a relação entre a largura do canal,  $W$ , e sua altura,  $H$ , e possui valor  $0 \leq \alpha \leq 1$ .

É importante notar na Eq. (8) o coeficiente de forma,  $C$ , associado ao fator de atrito relaciona-se com o diâmetro-hidráulico do canal,  $D_h$ , tal como calculado na Eq. (6).

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Fator de Atrito - $f$

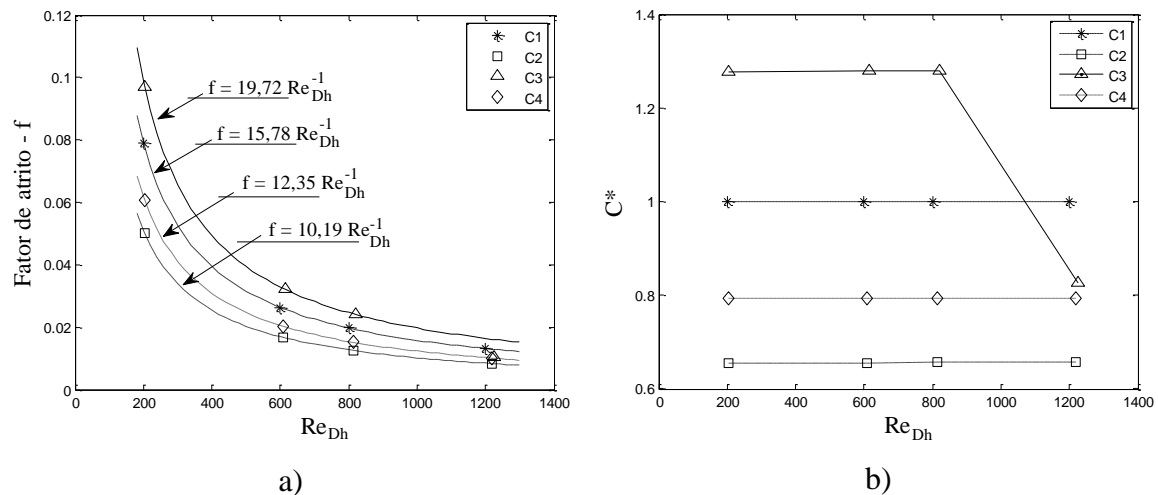
Dada a disponibilidade de soluções analíticas para o cálculo do fator de atrito em canais retangulares, simulações numéricas no canal retangular, C1, sem subcanal secundário foram executadas. As simulações foram feitas com os mesmos valores de Reynolds, baseados no diâmetro-hidráulico, usados nos canais compostos com o intuito de obter convergência de malha e valores da constante de forma do canal,  $C$ . Os resultados da simulação do canal retangular, C1, são mostrados na Figura 3. É possível notar que estes são satisfatoriamente aproximados  $f = 15,78 Re_{Dh}^{-1}$ , concordando com a Eq (8) proposta por Sharma e Müller (2006).



**Figura 3.** Fator de atrito médio  $f$  como função de  $Re_{Dh}$  para o canal retangular C1.

Na Figura 4 (a) são mostrados os resultados do cálculo do fator médio de atrito como função de todos os canais simulados. Os dados são graficados como função do número de Reynolds do escoamento baseado no diâmetro-hidráulico dos canais. Pode-se notar que todas as simulações são satisfatoriamente aproximada por funções do tipo  $f = C Re_{Dh}^{-1}$ , contudo as constantes de forma C variam de a cada tipo de canal. Contudo, é importante mencionar que a função não descreve completamente o canal C3. Nessa curva o ponto de maior número de Reynolds não está contemplado.

As soluções também mostram que, para os menores números de Reynolds, os fatores médios de atrito tendem a se afastar da curva que descreve o fator de atrito médio no canal retangular sem slot.



**Figura 4.** a) Fator de atrito médio  $f$  como função de  $Re_{Dh}$  para os canais C1, C2, C3 e C4.

b) Relação entre os fatores de forma dos canais como função do número de Reynolds.

Na Figura 4 (b) é mostrada uma relação de fatores de forma,  $C^* = C/C1$ , como função do número de Reynolds. Nessa figura alguns pontos são dignos de observação:

- ✓ A presença do slot influencia no cálculo do fator de atrito, e, por conseguinte, na perda de carga no canal;
- ✓ Os canais compostos simulados possuem maior perímetro quando comparado canal retangular, C1, contudo, somente o canal C3 possui  $C^* > 1$ . Para o restante dos canais compostos o valor de  $C^*$  é sempre inferior à unidade;
- ✓ A relação adimensional  $P/D$  parece não ser uma relação importante no problema envolvendo perda de carga, visto que os canais C3 e C4 possuem  $P/D = 2,50$ , porém diferentes valores de coeficiente de forma. Em contraste os valores do fator de atrito médio desses canais para  $Re_{Dh} = 1200$  são muito próximos;

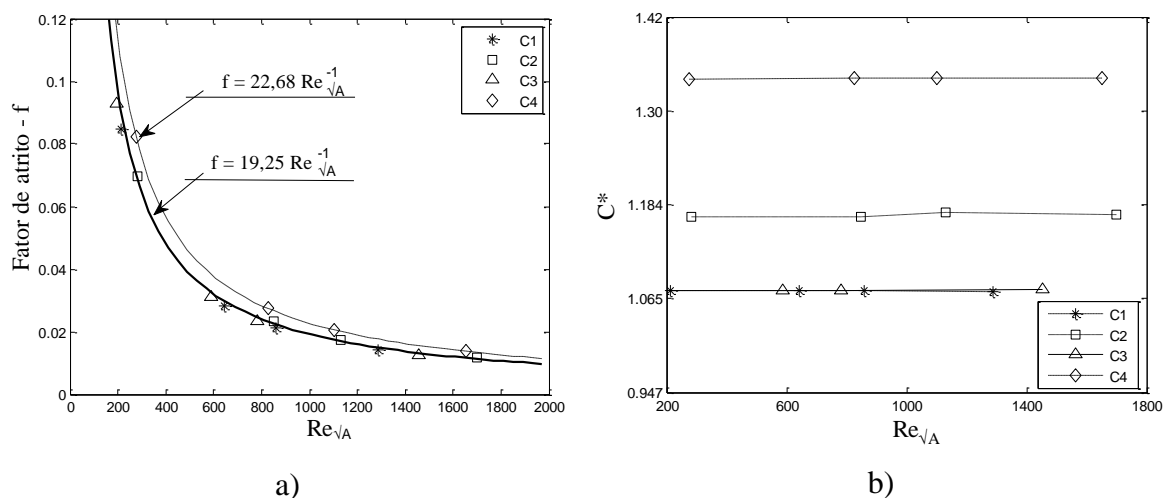


✓ Apesar das simulações mostrarem valores de forma constantes para diferentes números de Reynolds-hidráulico (exceto C3 para  $Re_{Dh} = 1200$ ) as soluções não mostram uma relação clara entre os parâmetros geométricos do canal e seus fatores de forma.

Dado o confuso resultado das Figura 4 (a) e (b), foi uma outra aproximação para o cálculo do fator de atrito e do fator de forma C. Muzychka e Yovanovich (1998) sugerem a adoção da raiz quadrada da área,  $\sqrt{A}$ , como escala de comprimento para o cálculo do fator médio de atrito. Segundo os autores, o conceito de diâmetro-hidráulico leva a melhores resultados para o escoamento turbulento. Os autores ainda apontam que a falha do uso diâmetro-hidráulico como escala de comprimento se deve ao fato de que a área computada desse valor não é a verdadeira área do duto para o caso de dutos não-circulares.

Na Figura 5 (a) são mostrados os resultados do fator de atrito médio no canal como função do número de Reynolds baseado na nova escala de comprimento,  $\sqrt{A}$ . Devido à mudança da escala de comprimento no cálculo do número de Reynolds estes valores foram alterados. Assim, baseados na raiz quadrada da área da seção transversal foram simulados escoamentos laminares com números de Reynolds variando de 200 a 1700.

A utilização da raiz quadrada da área da seção como escala de comprimento para o cálculo do fator médio de atrito mostrou resultados com menor discrepância a partir de uma linha de tendência, como visto na Figura 5 (a). Os valores das constantes de forma foram muito próximos para os canais C1, C2 e C3, variando entre 18,16 para C1 e 19,74 para o canal C2. O maior valor da constante de forma foi encontrado para o canal C4, sendo igual a 22,68.



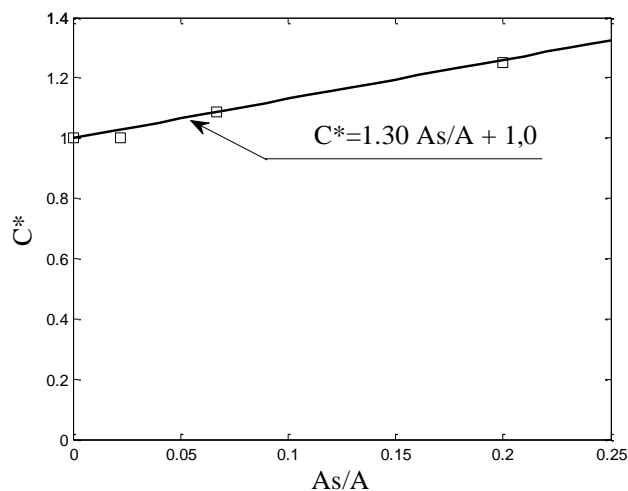
**Figura 5.** Fator de atrito (a) e de forma (b) com base em  $Re_{\sqrt{A}}$ .

Na Figura 5 (b) a relação entre os valores de forma encontrados nos canais compostos e aquele encontrado no canal de referência C1 ( $C^* = C/C1$ ), são mostrados como função da

relação entre as áreas do subcanal secundário e a área total da seção transversal do canal. Para o cálculo de  $C^*$  o valor de  $C1$  foi calculado analiticamente pelas funções apresentadas por Bahrami *et al.*(2006). As equações do autores empregam a raiz quadrada da área da seção transversal para o cálculo do fator de atrito. A utilização dessas equações levou a  $C1 = 18,61$ . Os valores simulados para  $C1$  tiveram um diferença média de 6% em relação ao previsto analiticamente pelas equações de Bahrami *et at.* (2006). Na Figura 5 (b) é interessante observar que à medida que o slot do canal aumenta, os valores da constante de forma  $C$  afastam-se do valor encontrado no canal de referência  $C1$  (canal retangular sem slot). Logo, uma clara referência quanto a presença do slot no canal, bem como de suas características geométricas, são mostradas nessa figura. A utilização da área da seção transversal como escala geométrica, em oposição ao diâmetro-hidráulico, não apresentou resultados confusos como na Figura 4 (b) e, dessa forma, relações de áreas podem ser utilizadas para o cálculo de  $C^*$ . Na Figura 6 são mostrados os valores de  $C^*$  como função da relação  $A_s/A$ . A área do slot é representada por  $A_s$  e a área total é  $A$ . Nessa figura, uma relação linear parece estabelecer uma tendência entre as grandezas. O conhecimento dessa relação permite calcular o fator de atrito para os canais compostos utilizando a Eq. (9).

$$f = C^* Re_{\sqrt{A}}^{-1}$$

$$C^* = f\left(\frac{A_s}{A}\right) \quad (9)$$



**Figura 6.** Relação entre os fatores de forma  $C^* = C/C1$  e a relação de áreas  $A_s/A$ .

#### 4.2 - Dinâmica do Escoamento – instabilidades laminares

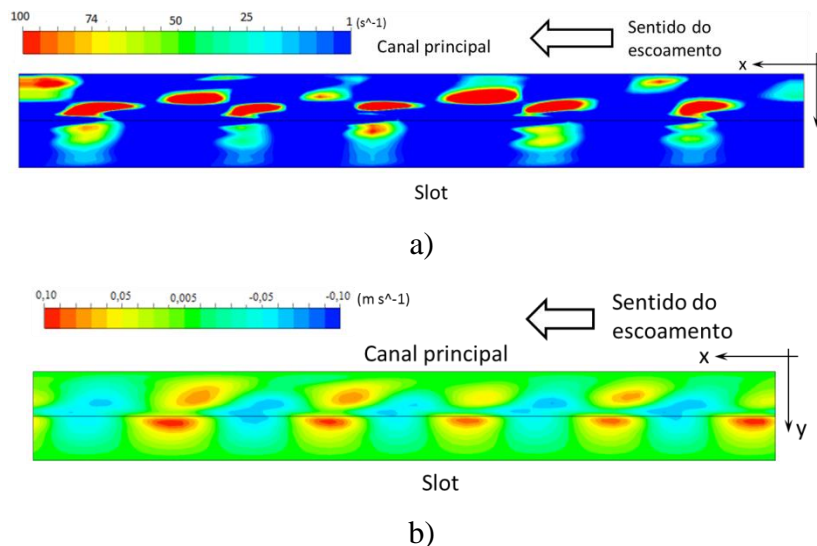
Uma das mais desafiantes características do escoamento em canais compostos é a correta predição de sua dinâmica. Canais compostos são conhecidos por, em certas circunstâncias,

apresentarem instabilidades na região da fenda. Essas instabilidades têm sido objeto de pesquisa, tanto numérica quanto experimentalmente, desde do trabalho de Rowe *et al.* (1974). Contudo, a maioria dos trabalhos têm seu foco em escoamentos laminares. Tais instabilidades levam ao aumento da difusão de passivos (como corantes e poluentes, por exemplo), do coeficiente de mistura e dos coeficientes de transferência de calor por convecção em problemas termo-hidráulicos.

Através do critério de visualização Q estruturas coerentes podem ser vistas no plano médio do canal. O critério Q relaciona o campo vortical,  $\Omega_{ij}$ , e o tensor taxa de deformação,  $S_{ij}$ , e é dado pela Eq. (10), tal como descrito por Hunt *et al.* (1988).

$$Q = \frac{1}{2} \left( |\Omega_{ij}|^2 - |S_{ij}|^2 \right) \quad (10)$$

Na Eq. (10) o critério Q é positivo quando o termo de rotação,  $\Omega_{ij}$ , se sobrepõe ao termo de deformação,  $S_{ij}$ , evidenciando áreas no campo do escoamento onde a rotação é importante. A Figura 7 (a) mostra a quantidade escalar Q no plano médio do canal para  $Q \geq 0$ . Junto à fenda pode-se constatar que o valor da variável é maior, indicando predominância da rotação. Juntamente ao critério Q são mostradas as iso-superfícies de velocidades instantâneas na transversal (v). Onde o critério Q mostrou seus maiores valores, a iso-superfície de velocidade instantânea transversal mostra estruturas coerentes girando em sentidos opostos convectando-se a jusante com uma certa velocidade,  $U_c$ .



**Figura 7.** a) Visualização de estruturas coerentes através do critério Q. b) Iso-superfície de velocidades instantâneas na direção transversal.

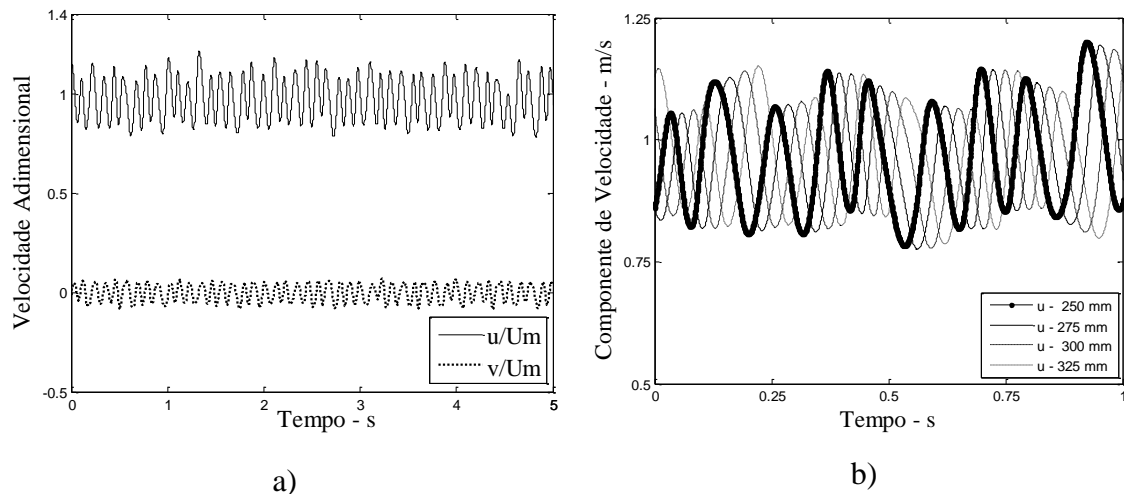
As principais características dessas instabilidades são os padrões oscilatórios de flutuação de velocidade na região do slot e a formação de estruturas coerentes na região. A

caracterização da dinâmica do escoamento passa pela correta previsão do surgimento ou não dessas estruturas, da frequência fundamental do padrão oscilatório das flutuações e da velocidade de convecção desses vórtices (estruturas coerentes),  $U_c$ .

A Figura 8 (a) e (b) apresenta o histórico de flutuações de velocidade nas direções principal do escoamento  $x'x$  e na direção transversal  $y'y$  (eixos conforme mostrado na Figura 1). A sonda virtual foi posicionada na fronteira entre o slot e o canal principal.

Os dados de velocidade da Figura 8 (a) foram adimensionalizados pela velocidade média do canal,  $U_m$ , evidenciando um claro padrão oscilatório típico de escoamentos turbulento em canais compostos. Nessa figura, algumas características merecem atenção, como as flutuações de velocidade e sua periodicidade. As flutuações de velocidade na direção principal mostram picos de aproximadamente 23% da velocidade média do canal. Este valor foi bastante superior a flutuação de velocidade encontrada na direção transversal. Nessa direção, as maiores flutuações são quase 8% do valor da velocidade média do canal, implicando em transferência de quantidade de movimento, massa e energia entre subcanais adjacentes.

Na Figura 9 (b) os dados de velocidade axial são medidos nas mesmas posições  $y$  e  $z$ , contudo em diferentes posições a jusante da entrada do canal. Observa-se uma clara defasagem os sinais que será discutido nos próximos parágrafos.

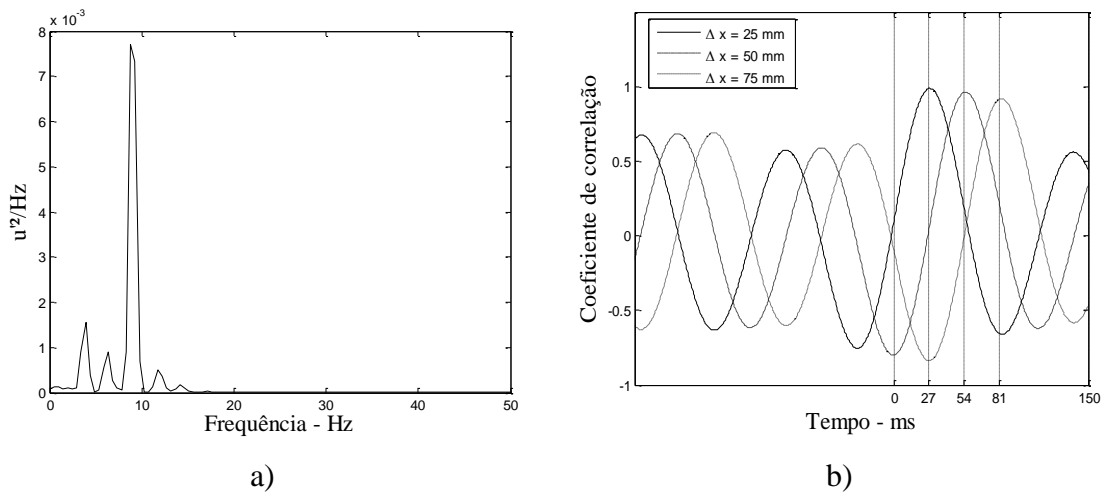


**Figura 8.** a) Histórico das componentes  $u$  e  $v$  de velocidade. b) Históricos da componente principal de velocidade para vários pontos na direção axial.

Através do autoespectro de potência, a frequência fundamental da série histórica de velocidades foi calculada, Figura 9 (a), e o valor da frequência fundamental encontrado foi de 9 Hz. Meyer e Rehme (1995) sugeriram um número de Strouhal baseado na frequência fundamental do espectro,  $f$ , nas dimensões  $P$  e  $D$  do slot e na velocidade da fenda,  $U_{ed}$ , eq. (11)

$$St = \frac{f\sqrt{PD}}{U_{ed}} \quad (11)$$

Os valores experimentais dos autores mostraram um número de Strouhal igual  $0,066 \pm 0,011$ . Esse valor é inferior ao presente trabalho, que encontrou 0,178, contudo, para números de Reynolds tão baixo quanto o simulado pelo presente trabalho não há soluções espectrais experimentais disponíveis para comparação. Os valores publicados por Meyer e Rehme (1995) fazem referência a valores de Reynolds baixos, porém ainda turbulentos.



**Figura 9.** a) Autoespectro de potência das flutuações de velocidade na direção principal do escoamento. b) Correlação cruzada de flutuação de velocidade.

A correlação cruzada dos sinais de flutuação de velocidade da Figura 8 (b) é mostrada na Figura 9 (b). Pode-se notar que há um atraso de 27 ms entre os sinais. Isso implica que fenômenos que acontecem na sonda disposta em  $\text{Pos}(x=100 \text{ mm})$  no tempo  $t$ , acontecerão na sonda  $\text{Pos}(x = 125 \text{ mm})$  no tempo  $t = t + 27 \text{ ms}$ . Dessa forma, a velocidade de convecção de estruturas coerentes,  $U_c$ , pode ser calculada por

$$U_c = \frac{\text{Pos}(x_2) - \text{Pos}(x_1)}{t + \Delta t - t} \quad (12)$$

onde  $\Delta t$  é o atraso entre dois sinais obtidos ao mesmo tempo. As posições  $\text{Pos}(x_2) - \text{Pos}(x_1)$  é a distância espacial entre as tomadas de velocidade (25 mm). A Eq. (12) leva a uma velocidade de convecção,  $U_c = 0,93 \text{ m/s}$ , valor este bastante próximo à velocidade da borda,  $U_{ed} = 0,95 \text{ m/s}$ . Como citado anteriormente, Meyer e Rehme (1995) caracterizaram experimentalmente as flutuações de velocidade nesse tipo de canal, porém para maiores valores de números de Reynolds (indicando escoamento turbulento). Os autores estudaram experimentalmente 03 tipos de canais com várias relações adimensionais  $P/D$ . Seu trabalho experimental mostrou que, para as geometrias estudadas pelos autores, sob escoamento turbulento, há a relação  $U_{ed}/U_c = 1,37 \pm 0,14$ . Não há na literatura simulações ou experimentação de escoamento laminar no

tipo de canal apresentado no presente trabalho, dificultando uma comparação quantitativa dos resultados do presente trabalho com outros autores.

## 5 - CONCLUSÃO

No presente trabalho, o fator médio de atrito e o coeficiente de forma de um canal composto foram avaliados, bem como as características dinâmicas do escoamento laminar em seu interior. Para tanto, simulações numéricas foram realizadas utilizando uma plataforma comercial. Foram investigadas 4 seções de testes, sendo uma retangular (de referência) e outras três com um subcanal em uma de suas paredes laterais. Para cada uma das seções estudadas, o número Reynolds estendeu-se na faixa de 200 a 1200, sendo esse baseado no diâmetro-hidráulico,  $D_h$ , na velocidade média do canal,  $U_m$  e na viscosidade cinemática do fluido,  $\nu$ .

Os resultados mostraram que o fator de atrito médio do canal é inversamente proporcional ao número de Reynolds,  $Re_{D_h}$ . Contudo, o fator de forma  $C$  para os canais compostos mostrou-se diferente para cada subcanal secundário, não apresentando uma relação clara entre a dimensões do subcanal,  $P$  e  $D$ , e a variável  $C$ .

A utilização da raiz quadrada da área da seção transversal do canal como escala de comprimento para os cálculos do fator de atrito médio  $f$  e do coeficiente de forma  $C$  mostrou-se uma escolha melhor quando comparada ao diâmetro-hidráulico,  $D_h$ . Os valores médios do coeficiente de atrito foram, satisfatoriamente, ajustados por uma curva do tipo  $f = C Re_{D_h}^{-1/\sqrt{\alpha}}$ . Além disso, o coeficiente de forma  $C$  pode ser relacionado claramente ao aumento da relação entre as áreas do slot e da seção transversal. Isso proporcionou o conhecimento do fator adimensional  $C^*$ , que relaciona os coeficientes de forma do canal principal e o calculado para o canal composto.

Soluções transientes também foram obtidas, tendo como principal objetivo avaliar o possível comportamento instável do escoamento laminar para esse tipo de canal composto. Foram simulados os campos transientes de velocidade para os canais C2, C3 e C4 para os maiores números de Reynolds. Para os menores valores absolutos de canal secundário (10 x 4 e 30 x 4 mm) não foram observadas instabilidades no campo do escoamento. Contudo, para o canal C4, 30 x 12 mm, o escoamento tornou-se instável produzindo padrões periódicos de flutuações na velocidade na região da fenda estreita. Na direção transversal do escoamento, as flutuações de velocidade chegaram a, aproximadamente, 8 % da velocidade média do canal, levando à troca de massa, quantidade de movimento e energia entre os diferentes subcanais. Esse resultado mostrou que a relação geométrica  $P/D$  tem pouca importância na formação de

instabilidades em canais compostos. Os canais C3 e C4 possuem a mesma relação adimensional, porém produziram diferente efeito dinâmico no escoamento.

A caracterização das flutuações de velocidade foram realizadas através de análise estatística do sinal e de correlações espaciais. O número de Strouhal calculado foi superior àqueles que têm sido mostrado na literatura para escoamentos turbulentos. Devido à falta de pesquisa nesse tema em escoamentos laminares, não foi possível uma comparação quantitativa como o trabalho de outros autores.

## **6 - Referências**

- Bahrami, M., Yovanovich, M. M. e Culham, J. R., 2006, “Pressure Drop of Fully-developed Laminar Flow in Microchannels of Arbitrary Cross-Section”, *Trans. ASME*, vol. 128, pp. 1036.
- Gunnasegaran, P., Mohammed, H., Shuaib, N. H., 2009, “Pressure Drop and Friction Factor for Different Shapes of Microchannels”, 3<sup>rd</sup> International Conference on Energy and Environment, Malacca, Malaysia, December 7-8.
- Huminic, G., Huminic, A., 2013, “Numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluids in a flattened tube”, *International Communication in Heat and Mass Transfer* 44, pp. 52 – 57.
- Kaushal, D.R., Assefa, K.M., 2015, “A comparative study of friction factor correlations for high concentrate slurry flow in smooth pipes”, *J. Hydrol Hydromech.*, 63, 2015, 1, 13 -20.
- Meyer, L e Rheme, K., 1995, “Periodic vortices in flow through channels with longitudinal slots or fins”, *Tenth Symposium on Turbulent Shear Flow*, University Park, Pa, August 14-16.
- Muzychka, Y.S., Yovanovich, M.M., 1998, “Modeling Friction Factors in Non-Circular Ducts For Developing Laminar Flow”, 2<sup>nd</sup> AIAA Theoretical Fluid Mechanics Meeting, Albuquerque, NM, June 15-18.
- Papautsy, I., Ameel, T., 2001, “A Review of Laminar Single-Phase Flow in Microchannels”, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New York, NY, November 11-16.
- Sharma, K., Muller, Norbert e Selerowicz, W., 2006, “Experimental friction factor study for microchannel flows”, *The Sixth International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications*, Berkeley, CA, Nov 29 – December 1.

Soldini, L., Piattella, A., Brocchini, M., Mancinelli, A. and Bernetti, R., 2004, "Macrovortices-induced horizontal mixing in compound channels," *Ocean Dynamics*, 54, pp. 333 – 339.

Souza, S. I. S., Martins, H. A. and Goulart, J. N. V., 2014, "Numerical Investigation of Heat Transfer in a Turbulent Flow in Channels with Gap," *Thermal Engineering (RETERM)*, 13 (2), pp. 96 – 103.