

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS EM CANAIS COMPOSTOS

C. M. Xavier, carlamxavier@cpovo.net

S. V. Möller, svmoller@ufrgs.br

A. P. Petry, adrianep@mecanica.ufrgs.br

PROMEC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Rua Sarmiento Leite, 425

90050-170 - Porto Alegre, RS, BRASIL

Resumo. O propósito deste trabalho é investigar numericamente e experimentalmente a distribuição de velocidade, bem como a estrutura da turbulência em um canal composto formado por um canal principal retangular e uma fenda em uma das paredes laterais. Para tanto foi utilizada a anemometria de fio quente, como técnica experimental e para a análise numérica foi introduzida a metodologia de Simulação de Grandes Escalas com o modelo clássico de Smagorinsky, partindo de um código computacional tridimensional. Na implementação do algoritmo foi utilizado o Método dos Elementos Finitos e, para integrar as Equações governantes, foi usado o esquema de Taylor-Galerkin para a discretização no tempo e no espaço. O elemento finito de discretização do domínio computacional é o hexaedro linear. Os resultados obtidos com Simulação de Grandes Escalas no modelo clássico de Smagorinsky tiveram boa concordância com dados experimentais.

Palavras chave: Anemometria de fio quente, Canais Compostos, Elementos Finitos, escoamento Turbulento e Modelos Submalha.

1. INTRODUÇÃO

De maneira geral os canais classificados como compostos são caracterizados pela presença de um canal principal e um ou mais canais secundários, sendo o uso destas estruturas bastante vasto na engenharia, começando em trocadores de calor, passando pelo interior de reatores nucleares e até mesmo em canais de água, principalmente canais artificiais. No entanto as investigações sobre o escoamento turbulento neste tipo de canal mostram características peculiares em relação à distribuição das tensões turbulentas e o coeficiente de transferência local de calor na fronteira entre dois canais.

Medições experimentais realizadas por Möller (1991), em um feixe de barras, com apenas uma linha, mostraram altos valores de intensidade de turbulência, para as componentes axial e azimutal de velocidade, na região das fendas e uma forte dependência entre o aumento destas quantidades e o decrescimento da distância entre os tubos. As flutuações das diferentes componentes de velocidade mostraram um comportamento quasi-periódico próximo às fendas, tal qual como identificado por Rowe *et al.* (1974), que sugeriram que estas pulsações do escoamento eram responsáveis pelo aumento das intensidades turbulentas junto na fenda.

Meyer e Rheme (1995), investigaram, experimentalmente, a distribuição de velocidade e as características do escoamento turbulento em canais retangulares com fendas na parede lateral, para uma faixa de número de Reynolds de 2300 até 100000. Para todas as configurações, a seção de testes foi assumida longa o suficiente para o desenvolvimento do escoamento, a relação entre o comprimento das seções e o diâmetro hidráulico, L/D_h , variou entre 45 e 94.

Biemüller *et al.* (1996), investigaram numericamente as características do escoamento turbulento em dois canais retangulares conectados por uma fenda, junto à parede superior, usando Simulação de Grandes Escalas. A altura e largura do canal eram, respectivamente, 180 mm e 331,6 mm e seu comprimento 504 mm. A fenda que conecta os dois canais principais possui altura g e largura d , de 10,20 mm e 40,6 mm, respectivamente, portanto uma relação $g/d=4$. No domínio computacional a seção transversal foi considerada infinita, com condições de contorno periódicas nesta direção. Também obteve condições de contorno periódicas na direção principal do escoamento. O número de Reynolds da simulação variou de 3300 a 580000. Os resultados mostraram picos de tensões de Reynolds junto às fendas e grandes vórtices carregados pelo escoamento médio girando em direções opostas, como modelado por Möller (1991).

Merzari *et al.* (2008), fizeram um estudo detalhado em Dinâmica dos Fluidos Computacional para capturar as pulsações do fluxo em canais compostos. Duas geometrias diferentes foram investigadas e a Simulação de Grandes Escalas foi usada para estudar o fluxo em um duto retangular conectado por uma fenda.

O propósito deste trabalho é estudar numericamente e experimentalmente a característica dos campos de velocidade para um escoamento turbulento que se desenvolve em um canal composto formado por um canal principal retangular e uma fenda em uma das paredes laterais. Para tanto foram utilizadas técnicas de anemometria de fio quente e como ferramenta numérica a Simulação de Grandes Escalas no modelo clássico de Smagorinsky com aplicação de um código computacional para simular o escoamento transiente, quase-incompressível e tridimensional, desenvolvido por Petry (2002), usando o esquema de Taylor-Galerkin, com elemento hexaédrico de oito nós. As simulações de

escoamento em canal composto, presentes neste trabalho, confirmam a validação do projeto executado, porém igualmente demonstram que melhorias são necessárias para superar dificuldades em grandes problemas computacionais.

2. SEÇÃO DE TESTES E TÉCNICA EXPERIMENTAL

As investigações foram feitas em um canal retangular com 146 mm de altura e 193 mm de largura, onde, em uma das paredes laterais, está uma fenda, onde o escoamento se desenvolve. A fenda lateral tem profundidade $d = 80$ mm e largura $g = 20$ mm, portanto possuindo uma relação d/g igual a 4. Neste trabalho foi investigada a seção de teste com comprimento de 3300 mm. O fluido de trabalho utilizado é o ar em temperatura ambiente, sendo este dirigido por um ventilador centrífugo, passando por um difusor, um homogenizador e duas telas, chegando à seção de testes com intensidade de turbulência menor que 1%. Após a passagem pelas telas está localizado um tubo de Pitot, fixo, 150 mm a jusante das telas de proteção, através do qual a velocidade de referência U_{ref} , pode ser avaliada. Nesta configuração foi montada na saída do canal um tubo Venturi que proporcionou uma relação entre a velocidade de referência, lida através do tubo de Pitot, e a vazão, a fim de conhecer a velocidade média, grandeza necessária para a simulação numérica. Os números de Reynolds do experimento e da simulação foram calculados utilizando a velocidade média da seção e seu diâmetro-hidráulico, $D_h = 131,08$ mm, portanto, variando de $Re = 100$ até $Re = 185503$.

A Figura 1 (a) mostra uma visão esquemática da seção de testes estudada, onde a linha em vermelho mostra a localização da fenda. Nas Fig. 1 (b) e (c), vistas frontais do canal, todas as dimensões estão em mm. Na Fig. 1 (c), tem-se uma visão detalhada das posições onde foram medidas as velocidades.

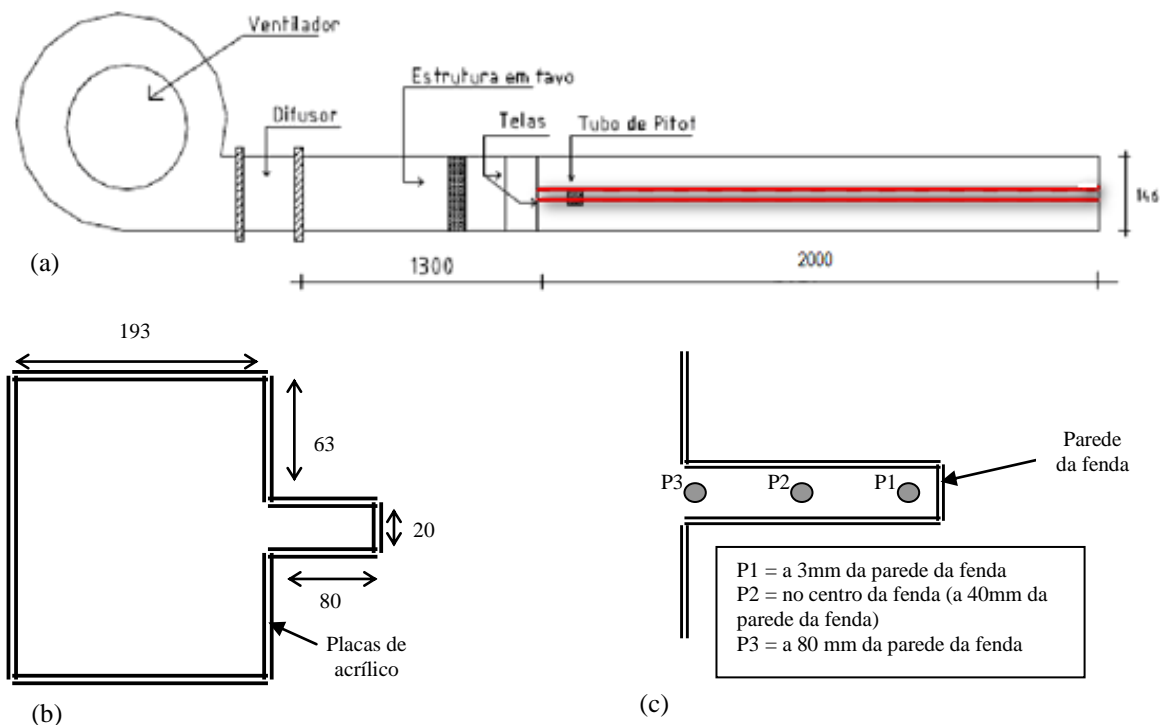


Figura 1. Visão esquemática da seção de testes.

a) vista lateral do canal; b) vista frontal do canal; c) detalhe dos pontos de medições de velocidades.

Os valores médios da componente axial de velocidade foram medidos utilizando um tubo de Pitot com diâmetro externo de 1,25 mm. Enquanto as flutuações das componentes axial w e transversal u , de velocidade, foram avaliadas via anemometria de fio quente, utilizando uma sonda de temperatura constante DANTEC StreamLine. Na medição simultânea de duas componentes de velocidade foi utilizada uma sonda dupla, que possui como uma especial característica um fio perpendicular ao escoamento principal e outro inclinado 45° . Na calibração dessa sonda dupla utilizou-se o método proposto por Collins e Williams (1959) mas com modificações importantes feitas por Indrusiak (2003), que permitiram as diferentes componentes de velocidade, mais detalhes em Goulart (2004) e Olinto e Möller (2004).

O tubo de Pitot e a sonda de fio quente foram localizados na fenda, no plano de simetria do canal e movidos ao longo desta linha por meio de um posicionador tri-axial. Neste trabalho a componente transversal de velocidade, u , é paralela a linha de simetria e a componente axial, w , é paralela a direção principal do escoamento. A aquisição dos

sinais de flutuação de velocidade foi feita utilizando uma placa conversora analógica digital, A/D, com 16 bits (National Instruments 9215-A), uma frequência de amostragem de 3KHz e filtro passa baixa em 1KHz. O tempo de duração dos registros foi de 21,84 s. O erro médio da determinação da velocidade com o anemômetro de fio quente foi aproximadamente 3%.

3. ASPECTOS MATEMÁTICOS E NUMÉRICOS

3.1. Equações Governantes

As equações para a Simulação de Grandes Escalas são derivadas (Petry, 2002) das Equações de conservação de massa, energia e momento de um escoamento viscoso, quase-incompressível, tridimensional, transiente e isotérmico de um fluido Newtoniano (White, 1974; Kawahara e Hirano, 1983). Na simulação de grandes escalas (Findikakis e Street, 1982) cada variável é decomposta em campo de grande escala (identificado por barra sobre a variável) e campo submalha (identificado pelo apóstrofo):

$$v_i = \bar{v}_i + v'_i \quad p = \bar{p} + p' \quad \rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (1)$$

Se a densidade é constante, então $\rho' = 0$.

Prosseguindo o processo de filtragem das equações de conservação de massa e da quantidade de movimento isotérmico, viscoso, quase-incompressível, tridimensional e transiente, as equações governantes são dadas por:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + C^2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_j) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_i \bar{v}_j) + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} \delta_{ij} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ v \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{v}_j) \right] + \frac{\lambda}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \bar{v}_k) \right] \delta_{ij} \right\} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \rho (\mathbf{L}_{ij} + \mathbf{C}_{ij} + \overline{v'_i v'_j}) \right\} - f_i = 0 \quad j = 1, 2, 3 \text{ em } \Omega \quad (3)$$

com as condições de contorno:

$$v_i = \hat{v}_i \quad \text{em } \Gamma_v \quad (4)$$

$$\left[\left[-\bar{p} + \frac{\lambda}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \bar{v}_k) \right] \delta_{ij} + v \left[\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{v}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \bar{v}_j) \right] \right] n_j = t_i \quad \text{em } \Gamma_t \quad (5)$$

e as correspondentes condições iniciais:

$$v_i = \hat{v}_{i0} \quad \text{em } t=0, \Omega \quad (6)$$

$$p = \hat{p}_0 \quad \text{em } t=0, \Omega \quad (7)$$

onde:

ρ → massa específica do fluido

v_i → componente da velocidade na direção i

x_i → coordenada na direção i

δ_{ij} → delta de Kronecker

\hat{v}_i → valores prescritos da velocidade i no contorno indicado

n_j → cosseno diretor do vetor normal ao contorno

t_i → valores prescritos das forças de superfície no contorno

μ → coeficiente de viscosidade dinâmica do fluido

λ → coeficiente de viscosidade volumétrica do fluido

C → velocidades de propagação do som

ν → viscosidade cinemática

\bar{v}_i → componente, correspondente às grandes escalas, do vetor de velocidade na direção x_i .

\bar{p} → pressão, componente correspondente às grandes escalas.

\underline{v}'_i → componente, correspondente às escalas submalha, do vetor de velocidade na direção x_i .

$L_{ij} = \overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j$ → termos de Leonard.

$C_{ij} = \overline{v_i v'_j} + \overline{v'_i v_j}$ → termos cruzados.

$\overline{v'_i v'_j}$ → tensor de Reynolds submalha.

Ω → domínio do problema

Γ_v → face do contorno com velocidade prescrita

Γ_t → face com condição de contorno natural

Os termos L_{ij} e C_{ij} podem ser negligenciados (Findikakis e Street, 1982). Estudos anteriores (Petry e Awruch, 1997) confirmam que a consideração desses termos não afetam significativamente os resultados e aumentam em torno de 20% o tempo de processamento.

As Equações (2) e (3), negligenciando os termos de Leonard e cruzados, com as condições de contorno e iniciais dadas pelas Equações (4), (5), (6) e (7), são as Equações governantes de um escoamento turbulento, isotérmico, quase-incompressível, de um fluido Newtoniano e, com as Equações dos modelos submalha, consistem no sistema a ser resolvido.

3.2 Modelos Submalha

Os dois modelos implementados são baseados no conceito de viscosidade turbulenta e usando a hipótese de Boussinesq, as tensões de Reynolds submalha são dadas por:

$$\overline{-v'_i v'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

onde ν_t é a viscosidade turbulenta.

Esta é a Equação original de Boussinesq. Usualmente para escoamentos incompressíveis a Equação (8) é modificada, introduzindo um termo com energia cinética submalha para fazer o modelo compatível com a Equação usual da conservação de massa para escoamentos incompressíveis (Hinze, 1975). Porém neste trabalho a Equação da continuidade é modificada, para escoamentos quase-incompressíveis, conseqüentemente, a Equação (8) é válida.

3.3 Modelo de Smagorinsky

O modelo de Smagorinsky (1963) tem sido tradicionalmente usado para representar o efeito das escalas submalha em simulação de grandes escalas (Findikakis e Street, 1982; Lesieur *et al.*, 1995). É um modelo de viscosidade turbulenta no qual as tensões de Reynolds submalha são dadas pela Equação (8) e a viscosidade turbulenta é definida como:

$$\nu_t = C_s^2 \bar{\Delta}^2 |\bar{S}| \quad (9)$$

onde C_s é a constante de Smagorinsky e os outros termos são dados por:

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

$$\bar{\Delta} = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^3 \Delta x_i} \quad (12)$$

4. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Simulações de escoamento em canal composto tridimensional com fenda lateral com número de Reynolds 100 e 3300 são realizadas. Os resultados são obtidos usando os modelos de Smagorinsky e comparados com dados experimentais descritos no item 2.

A geometria do canal composto e a malha uniforme de 98112 nós são mostradas, respectivamente, nas Fig. 2 e 3.

Como condições de contorno na entrada usa-se um perfil turbulento de velocidade, completamente desenvolvido ($v_1=V(y)$, $v_2=0$, $v_3=0$) e condição de não-deslizamento ($v_1=v_2=v_3=0$) prescrita nas paredes superior, inferior, esquerda e direita, bem como nos nós que formam as zonas superior e inferior à fenda. Na saída do canal existem condições de contorno naturais ($t_1=t_2=t_3=0$) (vide Equação(5)). As condições iniciais usadas são $v_1=10$ m/s, $v_2=v_3=p=0$. É importante observar que, diferentemente do procedimento normal adotado em simulações numéricas de escoamentos turbulentos em canais com Simulação Numérica Direta ou Simulação de Grandes Escalas, as condições de contorno nas direções x e z não serão periódicas.

Na Figura 4 são mostrados os resultados da simulação, com $Re=100$ e $Re=3300$, no modelo de Smagorinsky. Pode-se dizer que, até agora, os resultados concordam bem com os dados experimentais.

O passo de tempo utilizado para $Re=100$ foi de $5 \cdot 10^{-4}$ s e para $Re=3300$ foi de $1 \cdot 10^{-5}$, a constante de Smagorinsky, C_s , foi de 0,23.

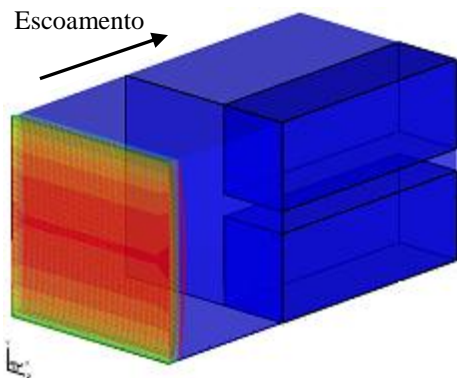


Figura 2. Geometria do canal.

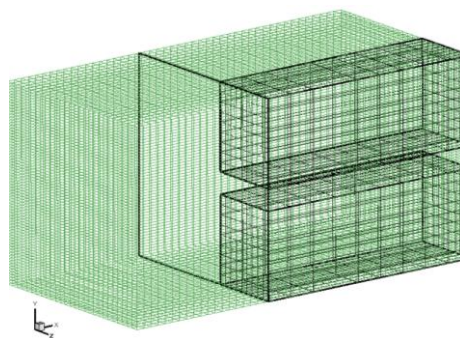


Figura 3. Malha uniforme.

5. RESULTADOS

Nas Figuras 4 e 5 são mostrados os resultados da simulação para a distribuição das componentes de velocidade média axial, em cortes no eixo x , com $Re = 100$ e $Re = 3300$, respectivamente. É observada uma região de máxima velocidade ocorrendo no canal principal e um patamar de velocidade praticamente constante a partir da região da fenda.

Na Figura 6 são mostrados os perfis de velocidade média axial.

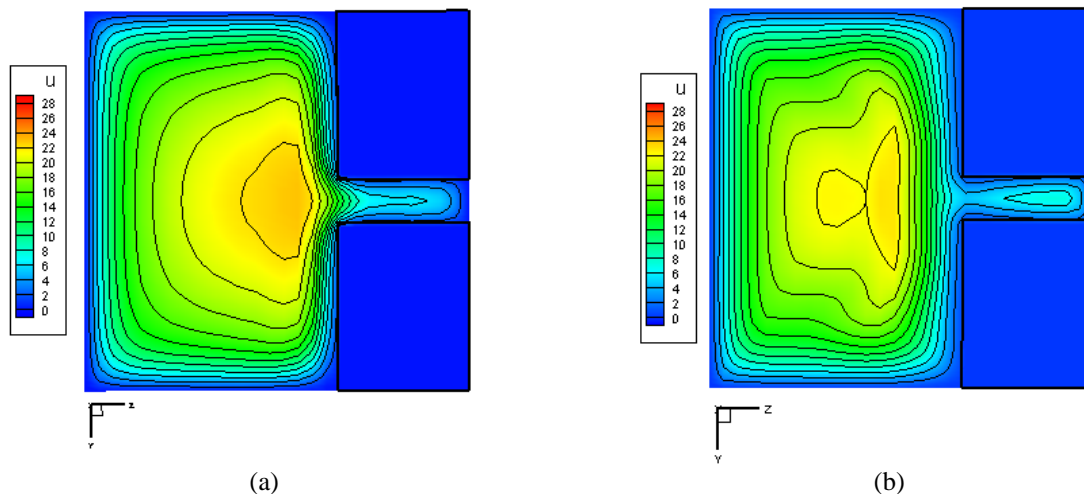


Figura 4. Contornos de velocidade média axial no início da fenda.
(a) $Re = 100 - x = 1,4$ m; (b) $Re = 3300 - x = 1,4$ m .

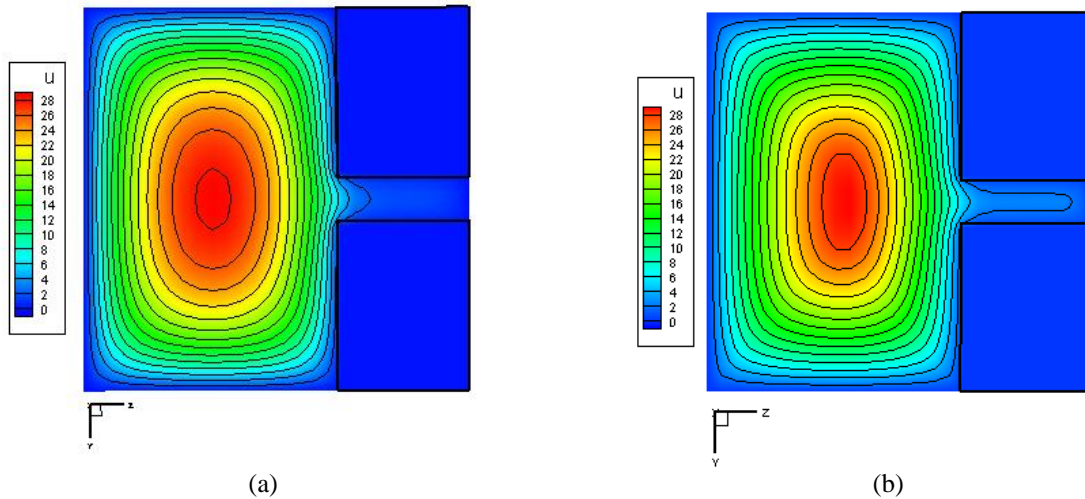


Figura 5. Contornos de velocidade média axial, 50 mm à montante da saída.
 (a) $Re = 100 - x = 3,25$ m; (b) $Re = 3300 - x = 3,25$ m.

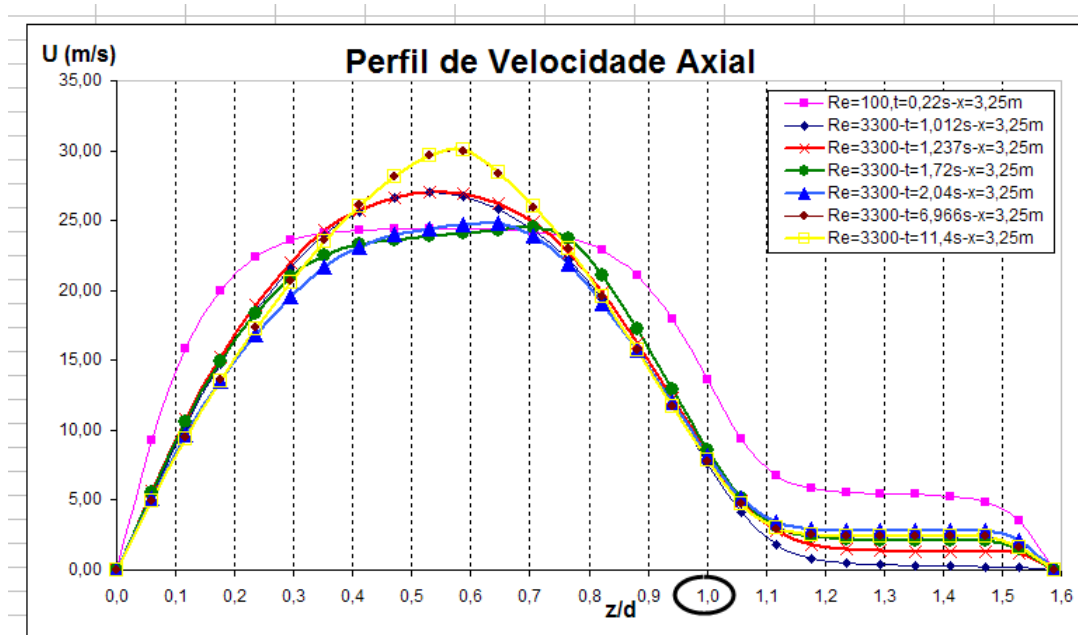


Figura 6. Perfis de velocidade axial.

5.1 A Estrutura da Turbulência

A Figura 7 mostra o mapa de isovorticidade no plano médio da fenda. São evidenciadas regiões de maior vorticidade próximas às paredes. A vorticidade no plano XZ é dada pela Eq. (13), no entanto assumindo que o gradiente da componente “u” de velocidade na direção principal do escoamento é muito menor em relação ao gradiente da componente axial de velocidade na direção transversal, “x”, então a vorticidade neste plano, pode ser assumida como o gradiente da componente “w” em relação à “x”, Eq. (14).

$$\Omega_y = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \quad (13)$$

$$\Omega_y \sim -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (14)$$

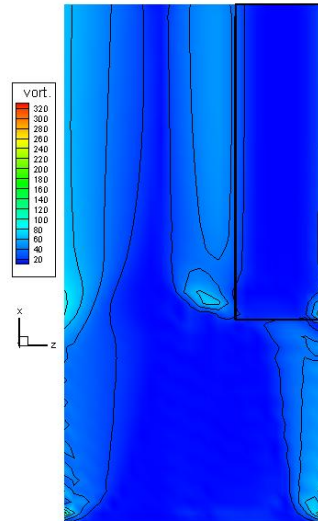


Figura 7. Regiões de isovorticidade, $Re = 3300$.

A visualização feita por Meyer e Rehme (1995), em um canal retangular com uma fenda longitudinal, onde $L/D_h = 94$, mostrou estruturas coerentes, estáveis e igualmente espaçadas, sendo carregadas pelo escoamento médio dentro do subcanal e segundo os autores com velocidade de convecção, $U_c = 0,70.U_e$, sendo U_e a velocidade da fronteira entre fenda e canal principal. Na Fig. 8, são mostrados os autoespectros de flutuação de velocidade para as componentes axial (azul) e transversal (vermelha), tomados nas posições 1, 2 e 3, já detalhadas na Fig. 1(c) e a 50 mm à montante da saída.

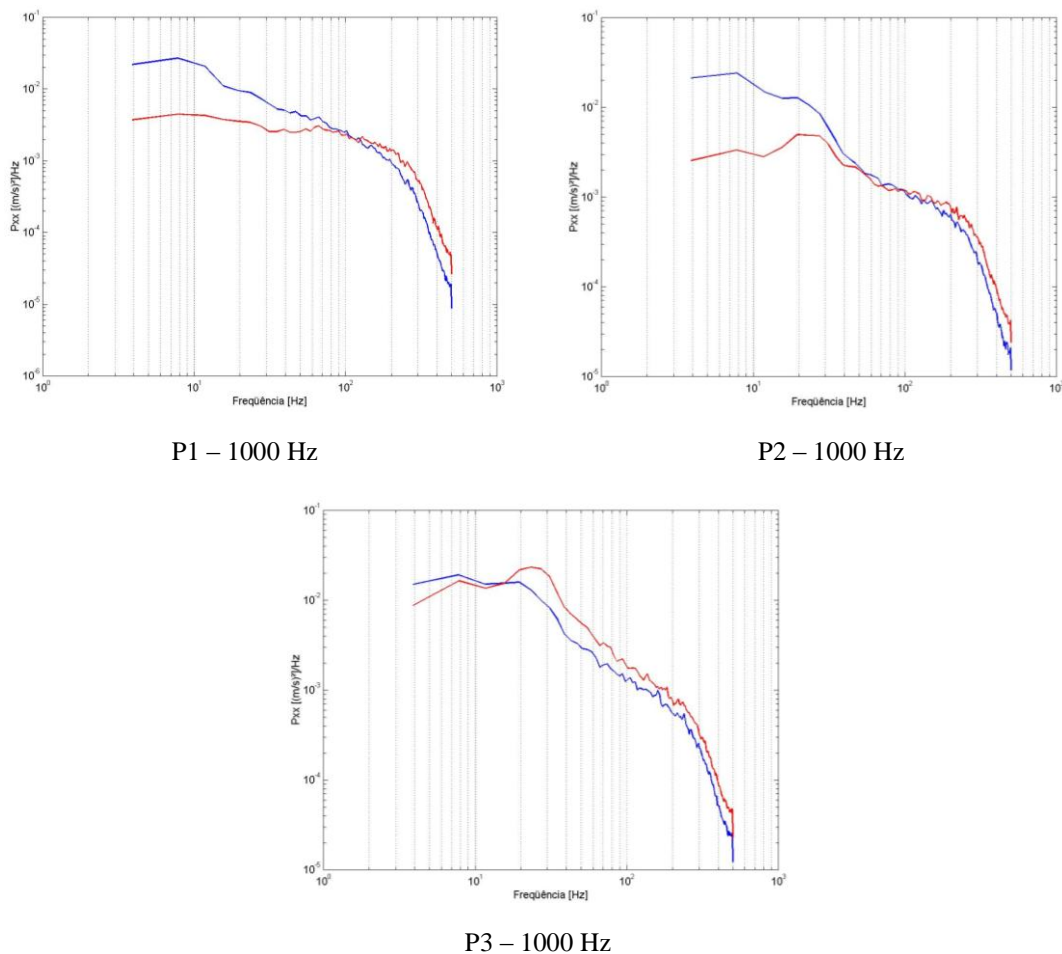


Figura 8. Autoespectros de flutuação de velocidade.

6. CONCLUSÕES

Foi apresentada para a análise numérica a metodologia de resolução de escoamentos de fluidos Newtonianos quase-incompressíveis, turbulentos, isotérmicos e transientes em canal composto retangular com uma fenda lateral, usando o método de elementos finitos e simulação de grandes escalas, com o modelo de Smagorinsky. Os resultados são coerentes com os dados experimentais. Para a análise experimental foi utilizada sonda dupla de fio quente.

A análise numérica desse problema apresentado aqui demonstrou a capacidade desta metodologia em simular escoamentos turbulentos complexos, sem limitações sobre a alocação de memória. A grande redução no passo de tempo de integração à medida que o número de Reynolds aumenta, acarreta em grandes tempos de processamento e inviabiliza a construção de uma malha mais refinada, o que traria melhorias na análise do escoamento para o canal composto com fenda. Pesquisas nesse aspecto estão em andamento.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Centro Nacional de Supercomputação da Região Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CESUP-RS/UFRGS). Carla M. Xavier agradece também a CAPES, pela bolsa de estudos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Biemüller, M., Meyer, L. and Rehme, K., 1996. "Large eddy simulation and measurement of the structure of turbulence in two rectangular channels connected by the gap", *Engineering Turbulence Modeling and Experiments* 3, Editors: Rodi, W. and Bergeles, G., 249-258.
- Collins, D. C., Williams, M. J., 1959. "Two-dimensional convection from heated wires at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 6, pp. 357-384.
- Findikakis, A.N. and Street, R.L., 1982. "Mathematical Description of Turbulent Flows", *Journal of Hydraulics Division, ASCE*, V108, N°HY8, paper 17265, p887-903.
- Goulart, J. N. V., 2004. "Estudo experimental dos campos de pressão e velocidade em feixes de tubos utilizando placas Defletoras"; *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.
- Hinze, J.O., 1975. "Turbulence", McGraw-Hill, New York.
- Indrusiak, M. L. V., 2003. "Caracterização de escoamentos turbulentos transientes usando a transformada de ondaletas"; *Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*.
- Kawahara, M., Hirano, H., 1983. "A Finite Element Method for High Reynolds Number Viscous Fluid Flow Using Two Step Explicit Scheme". *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, V.3, pp.137-163.
- Lesieur, M. Comte, P., Métais, O., 1995. "Numerical simulations of coherent vortices in turbulence", *ASME - Appl Mech Rev*, Vol. 48, N°4.
- Merzari, E., Ninokata, H., Baglietto, E., 2008. "Numerical simulation of flows in tight-lattice fuel bundles". *Nucl. Eng. Des.* 238, 1703-1719.
- Meyer, L. and Rehme, K., 1995. "Periodic vortices in flow through channels with longitudinal slots or fins", 10th Symposium on turbulent shear flows, The Pennsylvania State University, University Park, August 14-16.
- Möller, S. V., 1991. "On Phenomena of Turbulent Flow Through Rod Bundles". *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 4, n.1, pp. 25-35.
- Olinto, C. R. and Möller, S. 2004. "X-probe calibration using Collis and William's equation". In: 10° Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, 2004, Rio de Janeiro.
- Petry, A.P., 2002. "Análise Numérica de Escoamentos Turbulentos Tridimensionais Empregando o Método de Elementos Finitos e Simulação de Grandes Escalas", *Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre*.
- Petry, A.P., Awruch, A.M., 1997. "Turbulent Flows Simulation Using the Finite Element Method and Large Eddy Simulation"(in Portuguese), ENIEF 97, Proceedings, San Carlos de Bariloche, Argentina.
- Rowe, D.S., Johnson, B.M. and Knudsen, J. G., 1974. "Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 17, 407-419.
- Smagorinsky, J., 1963. "General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment", *Monthly Weather Reviews*, v. 91, pp. 99-164.
- White, F.M., 1974. "Viscous Fluid Flow", McGraw-Hill, New York.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF TURBULENT FLOWS IN COMPOUND CHANNELS

Abstract. *The purpose of this paper is to investigate numerically and experimentally the velocity distribution, as well as the structure of the turbulence in a compound channel formed by a rectangular main channel and a slot in one of the sidewalls. Anemometry of hot wire was used, as experimental technique and for the numerical analysis the methodology of Large Eddy Simulation with the classic model of Smagorinsky, a three-dimensional computational code was introduced. In the implementation of the algorithm the Method of Finite Elements was used, to integrate the governing equations, was used the project of Taylor-Galerkin for the discretização in the time and the space. The finite element of discretização of the computational domain is hexahedral eight-node. The results obtained with Large Eddy Simulation in the classic model of Smagorinsky had good agreement with experimental data.*

Keywords: *Anemometry of hot wire, Compound Channel, Finite Elements, Turbulent Flows and Subgrid Scale Models.*