

Distribuição de Velocidade em Canais Compostos: Investigação numérica e experimental

J. N. V. Goulart¹

jhongoulart@yahoo.com.br

S.V. Möller²

svmoller@ufrgs.br

A. P. Petry³

adrianep@mecanica.ufrgs.br

PROMEC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul¹⁻²⁻³
Rua Sarmento Leite, 425
90050-170 - Porto Alegre, RS, BRASIL

Resumo. O propósito deste trabalho é investigar numérica e experimentalmente a distribuição de velocidade, bem como a estrutura da turbulência em um canal composto formado por um canal principal retangular e duas placas paralelas conectadas a uma das paredes laterais, de forma que o comprimento total, L , pudesse ser variado. Para tanto foi utilizada a anemometria de fio quente, como técnica experimental e o software CFX®, versão 5.6, na simulação do escoamento, utilizando os modelos de turbulência $k-\epsilon$ e Simulação de Grandes Escalas, SGE. Os dados, tanto numéricos como experimentais, mostraram um escoamento altamente cisalhante na fronteira entre os dois canais com estruturas coerentes carregadas pelo escoamento médio.

Palavras chave: simulação numérica, canais compostos, escoamento cisalhante, estruturas coerentes.

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 dentro engenharia, começando em trocadores de calor, passando pelo interior de reatores 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 distancia entre os tubos. As flutuações das diferentes componentes de velocidade mostraram um comportamento quasi-periódico próximo as fendas, tal qual como identificado por Rowe et al., 1974, que sugeria 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 a características do escoamento turbulento em canais retangulares com slots na parede lateral, para uma faixa de número de Reynolds de 2300 até 10^5 . Para todas as configurações, a seção de teste 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. Neste trabalho, além das diferentes configurações das seções de teste, também foi analisada a influência da viscosidade e dos parâmetros geométricos do slot, como largura "g" e profundidade "d", na formação dos campos de velocidade e no comportamento dinâmico da turbulência dentro da fenda. De forma geral os campos de velocidade mostram-se qualitativamente muito semelhantes com o aumento da viscosidade, enquanto os auto-espectros de flutuação de velocidade mostraram picos, mesmo para valores de Reynolds tão baixos quanto $Re=150$, indicando a presença destas estruturas coerentes, que segundo o autor estão presentes em qualquer slot longitudinal onde a profundidade é maior ou igual a duas vezes a largura da fenda, $d \geq 2g$. O comprimento de onda destas pulsações do escoamento mostrou-se ser constante para uma dada geometria e revelou-se uma função exclusivamente da geometria.

Biemüller et al. 1996, investigou numericamente as características do escoamento turbulento em dois canais retangulares conectados por uma fenda, junto a parede superior, usando Simulação de Grandes Escalas, SGE. A altura e largura do canal eram, respectivamente, 180 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 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 a direção principal do escoamento. O número de Reynolds da simulação variou entre $3,30 \times 10^3$ a $5,80 \times 10^5$.

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.

O propósito deste trabalho é estudar numérica e experimentalmente a característica dos campos de velocidade para um escoamento turbulento que se desenvolve entre duas placas paralelas. Para tanto foram utilizadas técnicas de anemometria de fio quente e como ferramenta numérica os modelos de turbulência $k-\omega$ e a Simulação de Grandes Escalas.

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, estão conectadas duas placas paralelas, onde o escoamento se desenvolve. As placas possuem comprimento "L" e estão distante entre si, por uma largura 14 mm, formando uma fenda (slot) lateral de profundidade, $p=70$ mm, portanto possuindo uma relação profundidade/largura igual a 5. Neste trabalho foram investigadas seções de teste de dois comprimentos diferentes, 650 e 2020 mm. O fluido de trabalho utilizado é o ar, a temperatura ambiente, sendo este dirigido por um ventilador centrífugo, passando por um difusor, um homogenizador e duas telas, chegando a 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. Em ambas as configurações 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, afim de conhecer a velocidade média, grandeza necessária a simulação numérica. O número de Reynolds dos experimentos e da simulação foram calculados utilizando a velocidade média da seção e seu diâmetro-hidráulico, $D_h = 113,85$ mm, portanto, $Re = 131500$.

A fig. 1 mostra uma visão esquemática das seções de testes estudadas, onde a linha tracejada em vermelho mostra a localização do slot, formado pelas placas paralelas. As fig 1 (a) e (b), são visões laterais do canal em suas duas configurações, enquanto na fig. 1 (c), tem-se uma visão frontal do canal, todas as dimensões estão em mm.

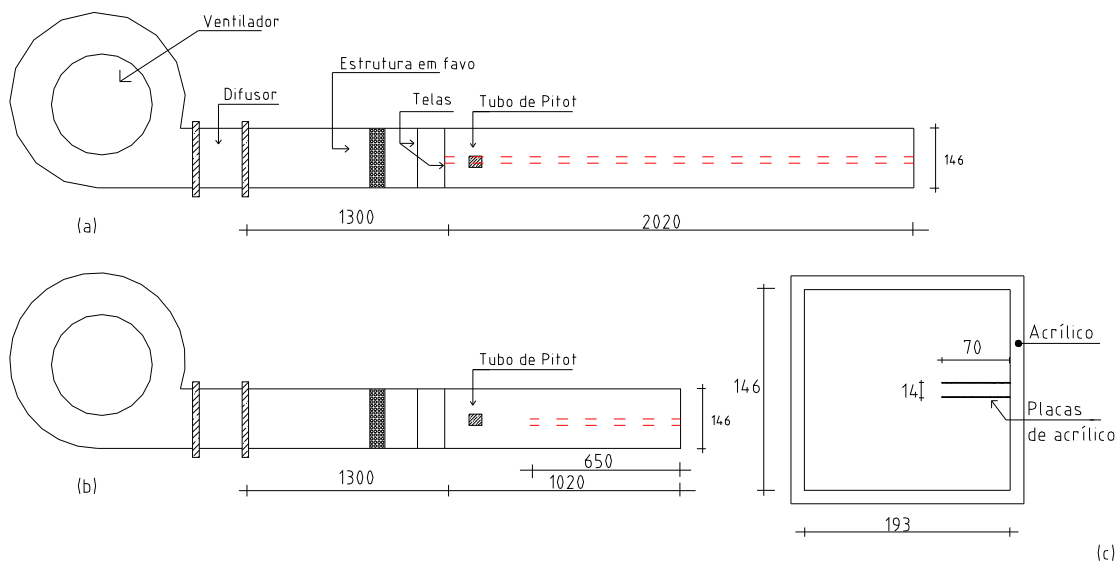


Figura 1. Visão esquemática da seção de testes.

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 da sonda dupla utilizou-se o método proposto por Collins e Williams, 1959, no entanto 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 entre as placas, 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 12 bit marca Keithley DAS58, uma frequência de amostragem de 3KHz e filtro passa baixa em 1KHz. O comprimento das séries temporais de flutuação de velocidade foi de 21,84 s.

A análise de incerteza dos resultados mostra uma contribuição de 1,4 % proveniente dos equipamentos de medição, anemômetro e placa conversora.

3. Simulação numérica

A simulação numérica, dos campos de velocidade e pressão, foi feita utilizando o software comercial CFX®, versão 5.6. Neste trabalho foram avaliadas duas diferentes modelagens de turbulência, o modelo $k-\omega$, para a solução estacionária do problema e uma avaliação transiente utilizando-se Simulação de Grandes escalas, SGE / Smagorinsk, sendo que para este último o passo de tempo utilizado e a constante de Smagorinsk, C_s , foram respectivamente, 5×10^{-4} s e 0,10. Os detalhes do equacionamento podem ser vistos em Goulart et al., 2004.

3.1. Discretização geométrica do domínio, condições de entrada e de contorno

Os domínios geométricos, para ambas seções, são mostrados na fig. 2 (a) e (b). Em ambos os casos somente foram simulados o escoamento dentro do canal, a partir das telas de proteção. Foi gerado em todo o domínio uma malha não estruturada, utilizando elementos tetraédricos e adjacente as paredes foram geradas camadas de elementos prismáticos, possibilitando uma análise mais relevante dos efeitos viscosos na região. O número necessário de elementos na discretização de ambos os domínios foi de 529544 na seção de 1020 mm e 80300 para a seção maior. Para a seção maior, 2020 mm, tentou-se uma discretização com 675000, no entanto os resultados preliminares foram bastante ruins, fazendo-se necessário uma maior quantidade de elementos, o que tornaria a solução muito lenta. Portanto a solução encontrada para o problema foi utilizar um plano de simetria, como mostrado na fig. 2 (a), na qual aparece somente parte do domínio na direção z . Em ambos os casos o escoamento se dá na direção z e os planos de saída indicados nas figuras.

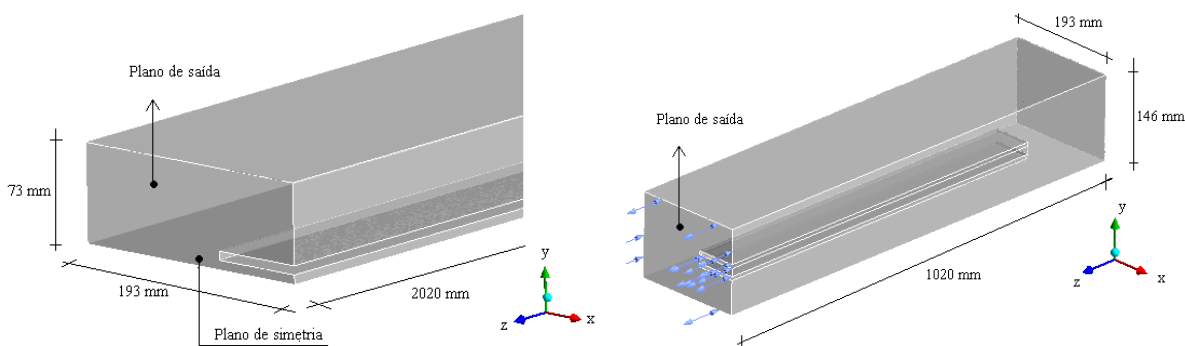


Figura 2. Discretização computacional do problema. a) seção maior, 2020 mm. b) seção menor, 1020 mm

Na região de entrada foi definido um campo de velocidade média com uma intensidade de turbulência de 1%. A velocidade média pode ser avaliada experimentalmente através da utilização de um tubo Venturi, colocado na saída do canal, para qual foi feita uma relação entre a velocidade de referência, U_{ref} , medida através do Pitot fixo, e a velocidade média do canal. A fig. 3 mostra esta relação para a seção de testes da fig. 2 (b).

Na região da saída foi definida uma pressão relativa igual a zero, sem escoamentos secundários assegurando vetores perpendiculares ao plano de saída. A condição de saída imposta permite o retorno do escoamento caso exista zonas de recirculação, neste caso, foi determinado que o fluido que retorna possui uma intensidade de turbulência de 5%.

A condição de não deslizamento foi imposta para todas as paredes.

Nos modelos $k-\omega$ e SGE/Smagorinsk, foram adotadas como condição inicial campos nulos de velocidade e pressão.

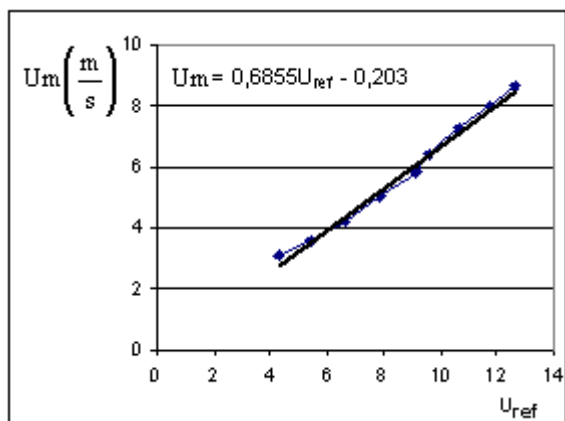


Figura 3. Relação entre velocidade de referência, U_{ref} , e velocidade média da seção, U_m .

4. Resultados

A fig. 4 (a) e (b), mostra a distribuição das componentes de velocidade média axial ao longo da linha de simetria, para as seções de teste (a) e (b), respectivamente. Nota-se que o modelo numérico empregado obteve bastante sucesso na predição do campo de velocidades, balizando as conclusões que possam ser tomadas a partir de então. As maiores diferenças podem ser encontradas na seção de testes (a), na região do canal principal, com uma diferença máxima entre os dados experimental e numérico de 7,40 %, podendo, esta diferença, ser atribuída ao sistema de medições de vazão, no qual fora utilizado manômetros diferenciais eletrônicos e de coluna de água.

Embora ambas as seções possuam a mesma relação profundidade/largura, a forma do perfil de velocidades se mostra diferente em ambas as seções, enquanto as velocidades máximas dentro do canal principal possuem os mesmos valores, as velocidades dentro da fenda são menores, indicando claramente que o escoamento não se encontra desenvolvido para estes comprimentos de entrada.

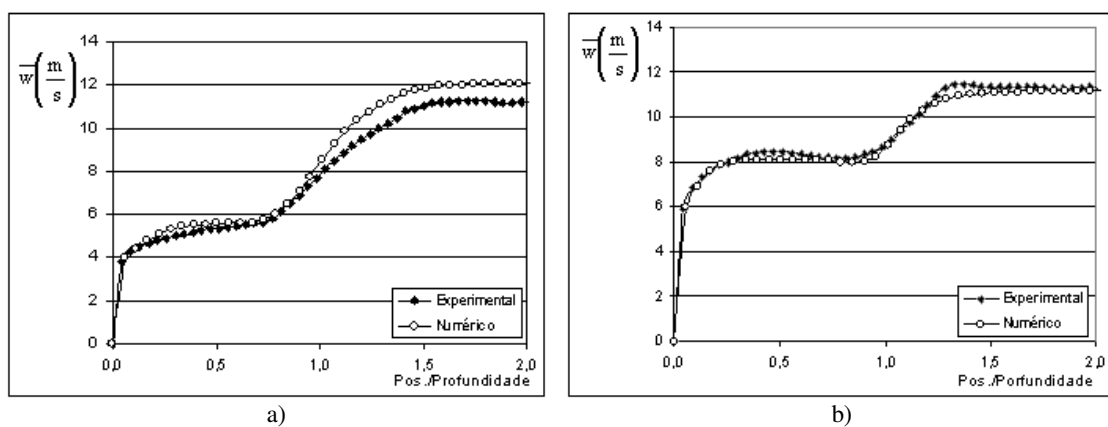


Figura 4. Distribuição da velocidade média axial ao longo da linha de simetria. A) seção de teste (a). b) seção de testes (b).

Os campos de velocidade média axial, 20 mm a montante da saída, são mostrados na fig. 5 (a) e (b), nota-se em ambas as figuras, os mapas de velocidade são bastante simétricos, no entanto, na seção maior, fig. 5 (a), há uma região de máxima velocidade ocorrendo no canal principal, diferentemente da fig 5(b) que possui velocidades maiores na região a fenda e uma região de velocidade máxima que se estende por boa parte do canal principal, tal como mostrado no perfil de velocidades na fig. 4 (b) na qual existe um patamar de velocidade praticamente constante a partir da região da fenda.

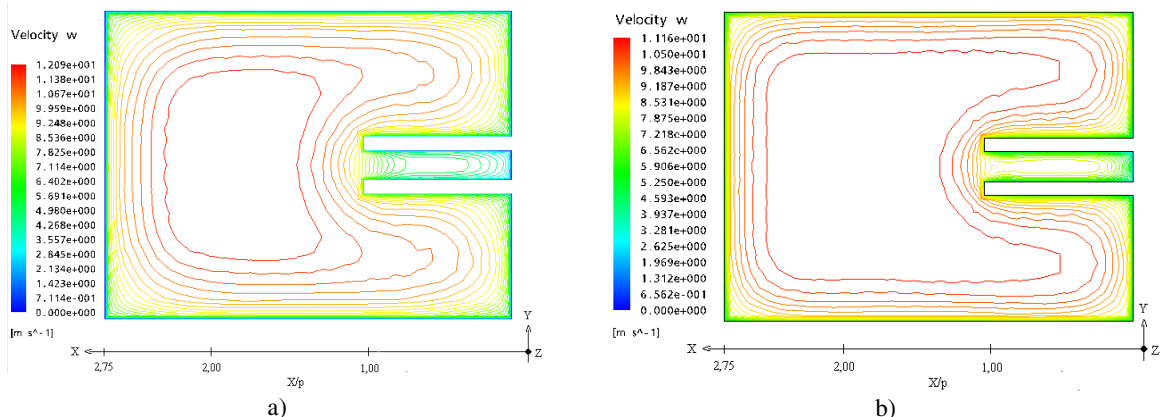


Figura 5. Contornos de velocidade média axial. a) seção de testes maior. b) seção de testes menor.

4.1 A estrutura da turbulência

A fig. 6(a) e (b), mostra o mapa de isovorticidade no plano médio da fenda, próximo a região da saída. Em ambos os casos são evidenciadas regiões de maiores vorticidade próximas às paredes e na fronteira entre o subcanal e o canal principal, no entanto a seção menor, fig. 6 (b), se difere por apresentar maior vorticidade em uma região mais estreita, na fronteira entre os dois canais, possuindo o valor máximo dentro do canal principal.

A vorticidade no plano XZ é dada pela equação 1, 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 a “x”, eq 2.

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

$$\Omega_y \sim \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right) \tag{2}$$

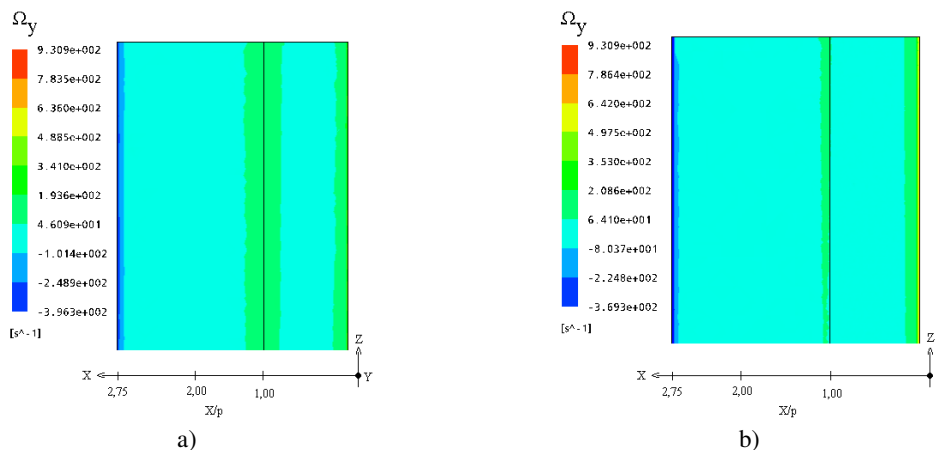


Figura 6. Regiões de isovorticidade. a) seção de testes maior. b) seção de testes menor.

A fig. 7 (a) e (b), mostra o gradiente de “w” em relação ao eixo “x”, com ambas as quantidades adimensionalizadas pela velocidade máxima e pela profundidade das placas, portanto, tem-se $\phi = u(x)/U_{max}$ e $\eta = x/p$.

Nota-se que os resultados experimentais e numéricos possuem uma boa concordância, enquanto na seção de testes maior, ambos resultados mostram picos de vorticidade dentro do sub canal e uma banda mais larga desta quantidade, na seção menor acontece o oposto, picos de vorticidade fora do subcanal e uma faixa mais estreita desta quantidade.

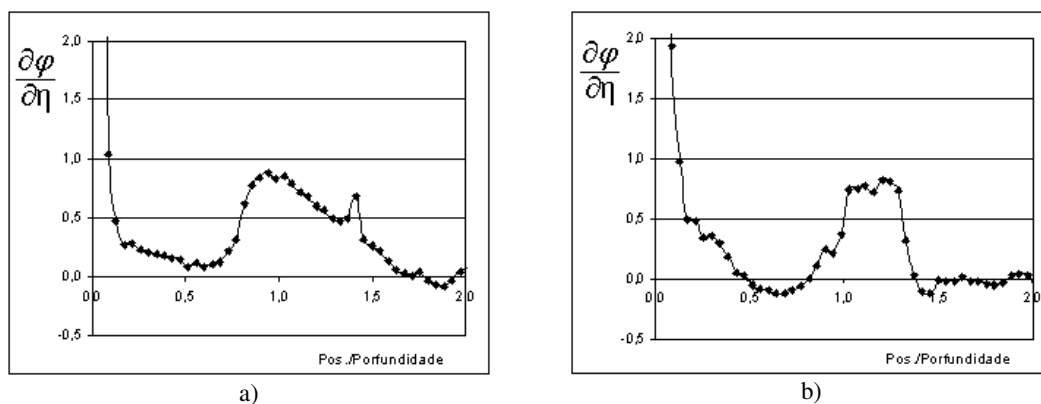


Figura 7. Gradientes de velocidade na direção “x”. a) seção de testes maior. b) seção de testes menor

A visualização feita por Meyer e Rehme, 1995, em um canal retangular com um slot 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 borda. A fig. 8 (a) e (b) mostra os vetores médios de velocidade no plano de simetria longitudinal da fenda, subtraídos da velocidade de convecção, U_c . Na seção maior são visíveis estruturas coerentes carregadas pelo escoamento médio com diâmetro da ordem da profundidade do slot, no entanto, diferentemente de Meyer e Rehme, 1995 e Biemüller et al., 1996, estes vórtices mostram-se quase que sobrepostos, enquanto nos trabalhos destes autores estas estruturas coerentes guardam uma distância entre si.

Na fig. 9 (a) e (b), são mostrados os autoespectros de flutuação de velocidade para as componentes axial (preta) e transversal (verde), tomados na mesma posição relativa, $x/p = 0,68$. Ambos os espectros confirmam os resultados numéricos, enquanto na seção maior os picos de frequência são bastante pronunciado, principalmente na componente transversal, o mesmo não ocorre na seção menor, fig. 9 (b).

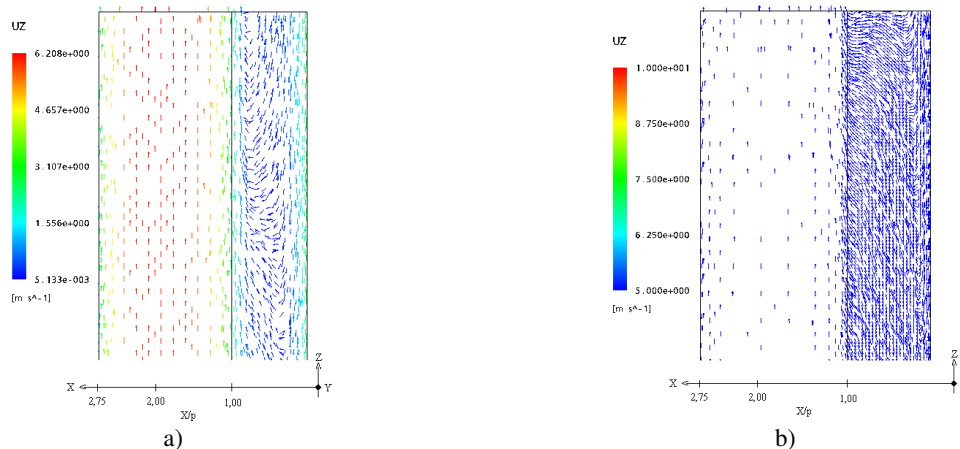


Figura 8. Vetores de velocidade no plano médio da fenda. a) seção de testes maior. b) seção de testes menor

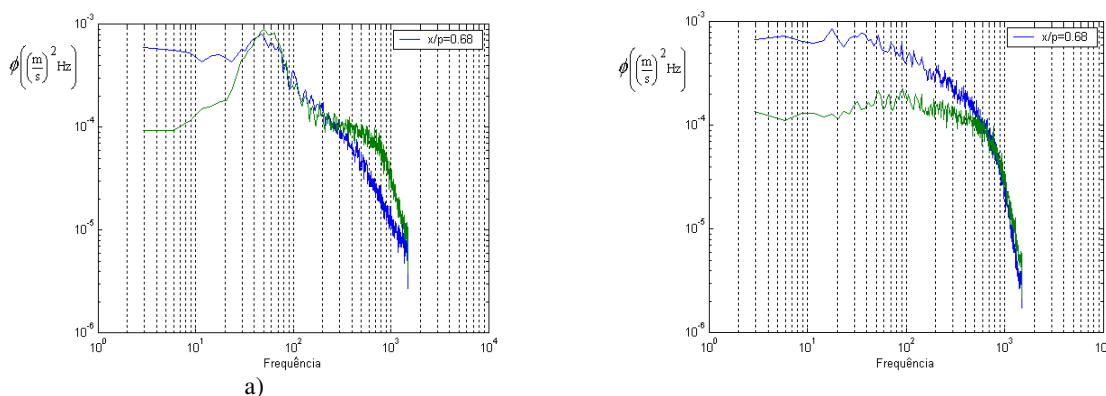


Figura 9. Autoespectros de flutuação de velocidade tomados em $x/p = 0,68$. a) seção de testes maior. b) seção de testes menor.

Os escoamentos secundários no plano, x- y, 20 mm a montante da região de saída, são mostrados na fig. 10 (a) e (b). Os resultados concordam qualitativamente com os resultados apresentados por Biemüller et al., 1996, e estão presentes em ambas seções de testes.

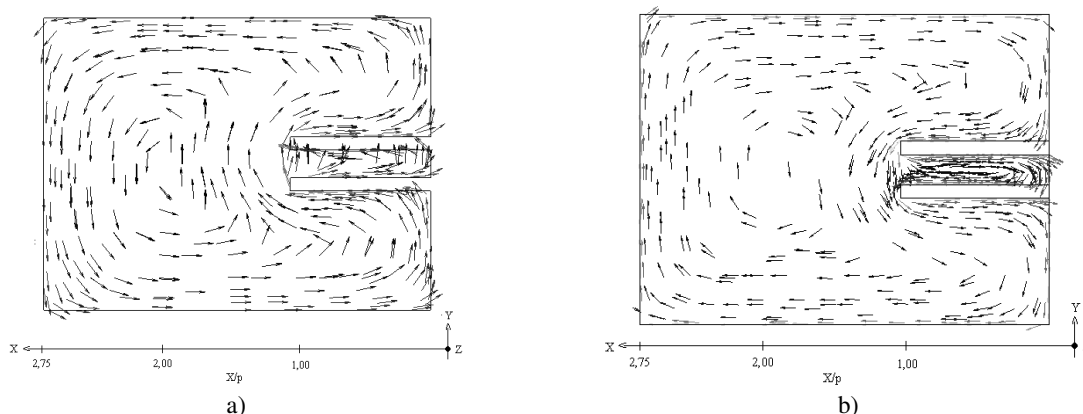


Figura 10. Escoamentos secundários no plano x-y, em ambas seções de teste.

Empregou-se Simulação de Grandes Escalas/Smagorinsk na maior seção de teste, L= 2020 mm. Quanto aos resultados, estes não foram satisfatórios devido ao pequeno tempo de simulação, somente, somente 0,5 s, no entanto o resultado parcial do perfil de velocidade média axial, fig. 11, mostra uma certa concordância com os dados experimentais, indicando que a solução evolui satisfatoriamente. Os resultados da fig. 11 foram avaliados na linha de simetria, 20 mm a montante da saída da seção.

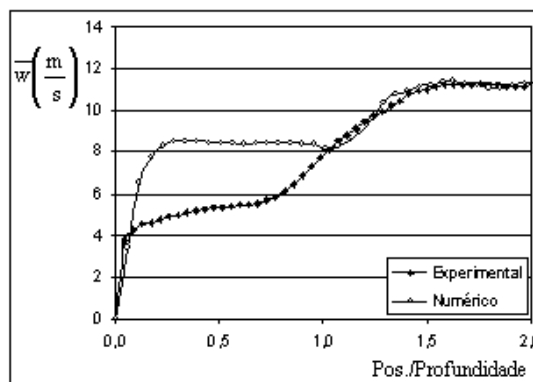


Figura 11. Perfil de velocidade no plano de simetria para a maior seção de testes.

5. Conclusões

O propósito deste trabalho é investigar a distribuição de velocidade, bem como a ocorrência de estruturas coerentes em um canal composto. Para tanto foram utilizadas ferramentas experimentais, sondas dupla de fio quente e ferramentas numéricas, simulação do escoamento via os modelos de turbulência k- ω e SGE/Smagorinsk.

A simulação numérica utilizando k- ω obteve uma boa concordância com os dados experimentais, principalmente porque o escoamento em questão não possui zonas de recirculação. Os resultados de distribuição da componente axial de velocidade mostraram que a variação de velocidade entre o canal principal e a região do “slot”, cresce a medida que o comprimento aumenta, bem como a região onde o gradiente de velocidade é maior, possibilitando a ocorrência de instabilidades.

Quanto ao uso de a modelagem via LES, na simulação do escoamento cisalhantes, os autores acreditam que a visualização transiente do campo de velocidades será de suma importância, no entanto o esforço computacional demandado combinado com a quantidade de elementos necessários na discretização do domínio, tornam bastante demorada a solução do problema.

No que diz respeito a formação de estruturas coerentes no plano médio das placas, o modelo permitiu observar e dirimir dúvidas quanto a existência destas estruturas, mostrando que a presença das mesmas e como estas se apresentam no interior do escoamento, não é somente uma função da profundidade e largura do slot, mas também do comprimento da seção de testes.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem todo o tipo de suporte dado pelo CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Jhon N. V. Goulart agradece também a CNPq, pelo pela bolsa de estudos.

7. Referências

- Biemüller, M., Meyer, L. And Rehme, K., 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, 1996.
- Goulart, J. N. V., 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, 2004.
- Goulart, J. N. V., Aguirre Oliveira Jr, J. A., Petry, A. P., Möller, S. V. escoamento Turbulento e Feixe de tubos: Análise Numérica e Experimental. In: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, 2004, Rio de Janeiro, 2004.
- Guellouz, M.S. and Tavoularis, S., The structure of the turbulent flow in a rectangular channel contening a single rod – Part 1: Reynolds-Average measurements, *Exp. Thermal and Fluid Sci.*, **23**, 59-73, 2000.
- Indrusiak, M. L. V. Caracterização de escoamentos turbulentos transientes usando a transformada de ondaletas; Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- Lesieur, M., *Turbulence in Fluids*, Third Edition, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1997.
- Meyer, L. and Rehme, K., Large-scale turbulence phenomena in compound rectangular channels, *Exp. Thermal Fluid Sci.*, **8**, 286-304, 1994.
- Meyer, L. and Rehme, K., Periodic vortices in flow though channels with longitudinal slots or fins, 10th Symposium on turbulent shear flows, The Pennsylvania State University, University Park, August 14-16, 1995.
- Möller, S. V., On Phenomena of Turbulent Flow Through Rod Bundles. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 4, n.1, pp. 25-35, 1991.
- Olinto, C. R. and Möller, S. X-probe calibration using Collis and William's equation. In: 10º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT, 2004, Rio de Janeiro, 2004.
- Rowe, D.S., Johnson, B.M. and Knudsen, J. G., Implications concerning rod bundle crossflow mixing based on measurements of turbulent flow structure, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **17**, 407-419, 1974.
- Schlichting, H. 1968. *Boundary Layer Theory*. 6th edn. N. York: McGraw-Hill.
- Soldini, L., Piattella, A., Brocchini, M., Mancinelli, A. e Bernetti, R. Macrovortices-induced horizontal mixing in compound channels, *Ocean Dynamics*, **54**, 333 – 339, 2004.

Velocity Distribution in Compound Channels: Numerical and Experimental Investigations

J. N. V. Goulart ¹

jhongoulart@yahoo.com.br

S. V. Möller ²

svmoller@ufrgs.br

A. P. Petry ³

adrianep@mecanica.ufrgs.br

PROMEC - Universidade Federal do Rio Grande do Sul ¹⁻²⁻³

Rua Sarmento Leite, 425

90050-170 - Porto Alegre, RS, BRASIL

Abstract

The purpose of this paper is to investigate, numerical and experimentally, the velocity distribution, as well the cture turbulence structure, inside a compound channel, formed by the main channel and two parallel plate connected on the lateral wall. In this channel the length “L” could be changed. Hot wire probes were used and, how numerical tool, was used the CFX[®] software, version 5.6, with k-ε and Large Eddy Simulations/Smagorinsk, models to predict the turbulence. The numerical and experimental results showed a shear flow, on the boundary of two sub channels and the coherent structures transported by the mean flow.

Keywords: numerical simulation, compound channels, shear flow, coherent structures.