

## Pulsações do Escoamento em Canais Compostos Curtos

J. N. V. Goulart

PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul<sup>(1)</sup>  
[jhongoulart@yahoo.com.br](mailto:jhongoulart@yahoo.com.br)

S. V. Möller

PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul<sup>(2)</sup>  
[svmoller@ufrgs.br](mailto:svmoller@ufrgs.br)

Rua Sarmiento Leite, 425 – Porto Alegre – Rio Grande do Sul – Brasil  
Porto Alegre – Rio Grande do Sul, Brasil  
cep: 90050 – 170

**Resumo:** Utilizando-se a técnica de anemometria de fio quente investigou-se pulsações no escoamento em canais compostos com pequeno comprimento de entrada. A geometria estudada consiste em duas placas paralelas com profundidade “p” e largura “d”, conectados por uma fenda, no qual o escoamento se desenvolve. Foram estudadas três diferentes seções de testes com a mesma relação p/d, embora o comprimento “L” da seção possa ser alterado. O propósito deste trabalho é investigar a presença de estruturas de grande escala neste tipo de escoamento e bem como determinar a influência dos parâmetros geométricos na formação ou detecção destas estruturas. Os resultados mostraram diferentes formas de perfis de velocidade e distribuição das tensões de Reynolds quando os parâmetros geométricos são mudados, sugerindo que a presença ou pelo menos a detecção destas estruturas esteja relacionada a mecanismos de instabilidade do perfil de velocidade.

**Palavras chave:** estruturas coerentes, escoamento em canais compostos, anemometria de fio quente

### 1. Introdução

Escoamentos em canais compostos são caracterizados pela presença de uma estreita região conectando dois canais principais, os quais mostram importantes características na região da fenda. Talvez a principal característica do escoamento neste tipo de canal seja a presença de estruturas de grande escala com comportamento quasi-periódico, sendo transportadas pelo escoamento principal. Tais estruturas são responsáveis pelo aumento das tensões turbulentas na região da fenda. Sendo este fato sempre presente em toda literatura aberta sobre escoamento turbulentos em canais compostos, tais como canais retangulares, conectados por um ou vários sub canais, escoamento em feixes de tubos (presente no interior de reatores nucleares e trocadores de calor), e até mesmo em alguns canais de abastecimento de água, Soldini et al., 2004.

As pulsações do escoamento turbulento em canais compostos foram encontradas por Rowe et al, 1974, em um feixe de barras, este observou uma forte periodicidade na componente axial de flutuação de velocidade, onde a frequência característica do sinal diminuía quando a relação entre o passo e o diâmetro dos tubos, P/D, aumentava. Möller, 1991, estudou as características do escoamento turbulento em um feixe de tubos na qual o comprimento da seção de testes foi considerado suficiente para o desenvolvimento do escoamento, sendo a relação entre o comprimento do canal, L, e seu diâmetro-hidráulico,  $D_h$ , de  $L/D_h = 43,75$ . Foram realizadas medições das quantidades flutuantes na região da fenda entre o feixe e a parede superior do canal, os resultados mostraram um escoamento com padrões periódicos na região da fenda, levando a proposição de um número de Strouhal formado com o diâmetro do tubo, D, a frequência característica dos sinais de flutuação de velocidade, f, e a velocidade de fricção,  $u^*$ . Embora um significativo número de trabalhos experimentais, envolvendo feixes de tubos, tenham sido realizadas, as conclusões a respeito da formação do número de Strouhal não são unânimes, indo desde equações puramente empíricas até equações formadas unicamente por grandezas do escoamento. Wu e Trupp, 1994, utilizando anemometria de fio quente, realizaram medições de flutuação de velocidade em um canal trapezoidal contendo um único feixe. Os resultados mostraram autoespectros com picos bastante pronunciados, confirmando a forte dependência existente entre a frequência característica e os parâmetros geométricos da seção, entretanto o número de Strouhal encontrado diverge daquele proposto por Möller, 1991, levando o autor a sugerir uma nova correlação para o número de Strouhal.

A presença destas estruturas de grande escala, também foram observadas em outros tipos de canais compostos. As características do escoamento entre placas ou em uma fenda, os quais se ligam a um canal principal, foram exaustivamente estudadas por Meyer e Rehme, 1995, utilizando anemometria de fio quente e técnicas de visualização. Neste estudo três diferentes seções foram analisadas, na primeira o escoamento se desenvolve em um canal principal com uma fenda na parede lateral, neste estudo a relação  $L/D_h = 48,15$ . As segunda e terceira seções de teste possuem duas placas e várias placas paralelas, respectivamente, ligadas a parede lateral do canal, sendo que relação entre o comprimento da seção e seu diâmetro-hidráulico,  $L/D_h$ , variou entre 48,50 e 94,0. Para o estudo em questão a profundidade do sub-canal, d, e sua largura, g, foram adimensionalizadas pela relação d/g e cobriu-se uma faixa de  $d/g = 1,66$  até  $d/g = 10,0$ . O autor afirma que a presença de grandes vórtices na região da fenda é um fato para este tipo de

canal, desde que  $d/g \geq 2$ , sendo tais resultados também confirmados através visualizações e correlações espaciais. Quanto a dependência com o número de Reynolds, o autor afirma que estas estruturas estão presentes para Reynolds tão baixos quanto 150. Na tentativa de formação de um número de Strouhal, o autor sugere uma correlação entre a frequência destas estruturas,  $f$ , a velocidade na borda da fenda,  $U_e$ , e a raiz quadrada do produto “ $d$ ” e “ $g$ ”, entretanto tais resultados mostraram erros consideráveis à medida que a relação profundidade/largura se torna menor que 2 e maior que 7.

Guellouz e Tavoularis, utilizaram técnicas de visualização e anemometria de fio quente, afim de investigar as pulsações do escoamento em um canal retangular contendo um único tubo. As medições foram feitas no plano entre o feixe e a parede inferior do canal. Os resultados mostraram um domínio destas estruturas na região da fenda, mesmo para fendas bastante largas,  $W/D = 1,35$ . Estes resultados confirmam os obtidos por Meyer e Rehme, 1995, os quais mostram que características como velocidade de transporte dos vórtices e o espaçamento entre eles é função do tamanho da fenda.

O propósito deste trabalho é investigar a presença de pulsações no escoamento em canais compostos, com pequeno comprimento de entrada, que contém uma única fenda, bem como determinar como os parâmetros geométricos influenciam na formação destas estruturas e na distribuição das tensões turbulentas na região da fenda.

## 2. Seção de Testes e Técnica Experimental

As investigações foram feitas em um canal retangular com 3320 mm de comprimento e 146 mm de altura. A largura do canal,  $w$ , poderia ser variada, sendo assim foram estudadas três diferentes configurações para este canal, apenas variando a dimensão “ $w$ ” para 60, 120 e 150 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, através do qual a velocidade de referência,  $U_{ref}$ , pode ser avaliada. Em todos casos a velocidade de referência é assumida a mesma,  $U_{ref} = 13,5$  m/s, no entanto pequenas variações no decorrer das trocas de seções foram detectadas e situaram-se na faixa entre 13,40 e 13,60 m/s. O número de Reynolds dos experimentos foram calculados utilizando a velocidade de referência e o diâmetro-hidráulico da seção, negligenciando o sub-canal formado pelas placas.

Dentro do canal, na parede lateral, foram montadas duas placas finas paralelas, com profundidade “ $p$ ”, largura (distância entre elas), “ $d$ ” e espessura,  $e = 1,2$  mm, de comprimento “ $L$ ”. Embora as dimensões das placas,  $p$ ,  $d$  e  $L$ , mudem de uma seção para outra, a relação existente entre a profundidade e a largura,  $p/d$ , permanece constante. A tabela 1, mostra as diferentes configurações das seções de teste em estudo e o número de Reynolds em seção.

Tabela.1: Configurações das seções de testes – (Dimensões em mm)

Número	w	p	d	L	p/d	w/p	$L/(pd)^{0,5}$	$D_h$	$Re_{dh}$
01	150	50	10	1250	5	3	55.90	148	$1,26 \times 10^3$
02	120	40	8	1000	5	3	55.90	148	$1,26 \times 10^3$
03	60	20	4	500	5	3	55.90	132	$1,12 \times 10^3$
04	150	50	10	500	5	3	22.36	132	$1,12 \times 10^3$
05	120	40	8	500	5	3	27.95	85	$7,26 \times 10^4$
06	60	20	4	250	5	3	27.95	85	$7,26 \times 10^4$

Os valores médios da componente axial de velocidade e a tensão de cisalhamento na parede foram medidos utilizando um tubo de Pitot e tubo de Preston (O.D.D = 1,25 mm), respectivamente. Enquanto as flutuações das componentes, axial,  $u$ , e transversal,  $w$ , 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 utilizou-se uma sonda dupla, que possui como característica especial um fio perpendicular ao escoamento principal e outro inclinado 45°. Na calibração da sonda, utilizou-se o método proposto por Collins and Williams, 1959, porém com importantes modificações feitas por Indrusiak, 2003, que permitiram a avaliação das 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 central, e movidos ao longo da linha de simetria, por meio de um posicionador tri-axial. A fig.1 mostra uma visão esquemática do canal utilizado no estudo, bem como as variáveis geométricas do problema,  $p$ ,  $d$  e  $w$  e o sistema de eixo indica a definição das componentes de velocidade axial ( $u$ ) e transversal ( $w$ ). Neste trabalho a componente transversal de velocidade,  $w$ , é paralela a linha de simetria. As componentes médias de velocidade, suas flutuações e tensão de cisalhamento na parede, foram obtidas 20 mm a montante da saída do canal. As medições de tensão de cisalhamento foram obtidas colando o tubo de Preston na parede lateral do canal no plano central entre as duas placas.

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 43,69 s.

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

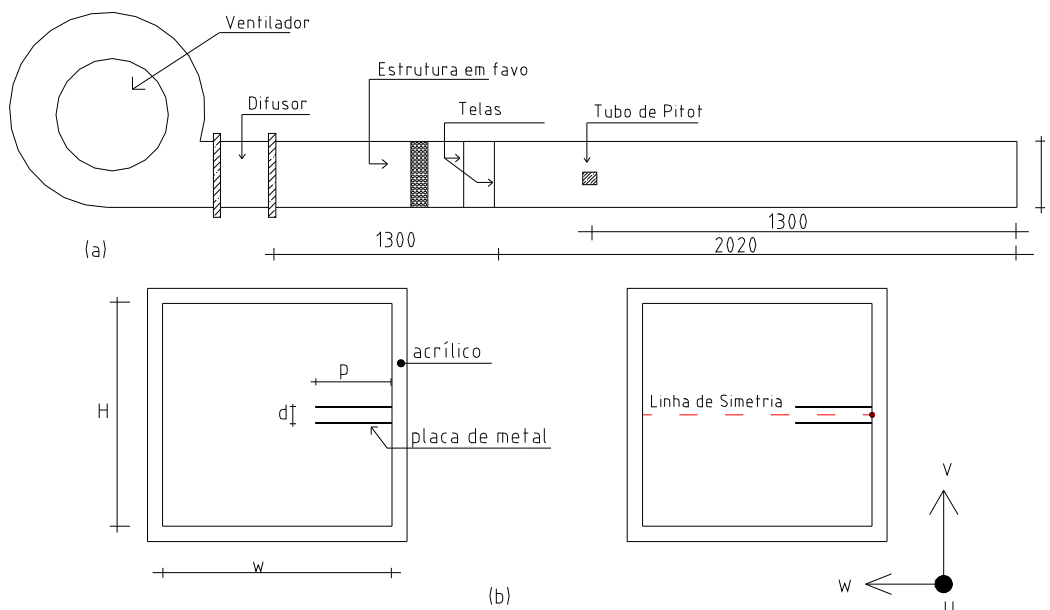


Figura 1. Visão esquemática da seção de testes: (a) configuração do túnel de vento e (b) visão frontal da seção de testes e localização da linha de medições.

### 3. Resultados

#### 3.1. O Perfil de Velocidades e suas Características

A figura 2 (a) e (b), mostra a distribuição da velocidade axial média, ao longo da linha de simetria para todas as seções de teste. Os dados de velocidade foram adimensionalizados pela velocidade máxima, enquanto as posições de leitura foram adimensionalizadas pela profundidade da seção, dimensão “p”. As figuras mostram a grande importância dos parâmetros geométricos na forma do perfil de velocidade, para seções de teste onde a dimensão “d” é menor, os efeitos viscosos são maiores, por conseguinte as velocidades dentro da fenda são menores. Já a profundidade da seção, dimensão “p”, tem bastante influência na distribuição de velocidade dentro da fenda, pode-se notar, principalmente na fig. 2(a) uma região de distribuição linear de velocidade que diminui com a redução de “p”. Nota-se que ao diminuir-se o comprimento das seções, fig. 2(b), os perfis de velocidade mudam significativamente, obtendo maiores velocidades dentro da fenda.

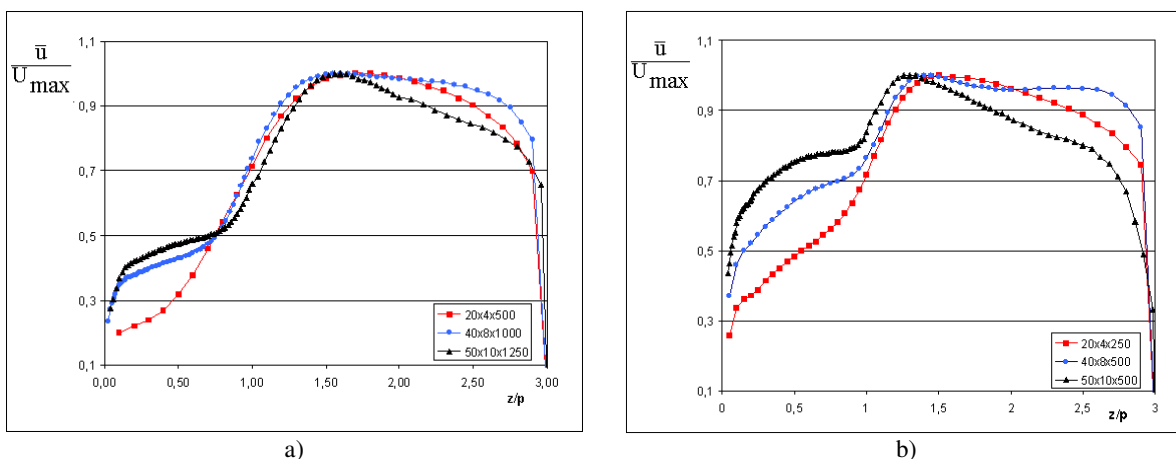


Figura 2 – Perfis de velocidade axial. a) seção de testes 1, 2 e 3. b) seção de testes 4, 5 e 6.

Nas figuras 3 (a) e (b), o gradiente da componente axial de velocidade é mostrados, os dados foram adimensionalizados pela velocidade máxima,  $\phi = u(z)/U_{max}$ , e a posição (z), adimensionalizada pela profundidade “p”,  $\eta = z/p$ . Em todas a seções, está presente um ponto de inflexão perto da borda, no entanto existe uma sutil diferença,

enquanto nas seções 1 e 2, fig. 3(a), o ponto de inflexão esta dentro da fenda, nas seções 3, 4, 5 e 6, este ponto se move em direção ao canal principal, encontrando-se localizado em torno de  $z/p = 1,15$ . A região de distribuição linear de velocidade pode ser bem observada na fig. 3 (a) principalmente nas seções 2 e 3, onde o gradiente de velocidade é quase constante até, aproximadamente,  $z/p = 0,60$ .

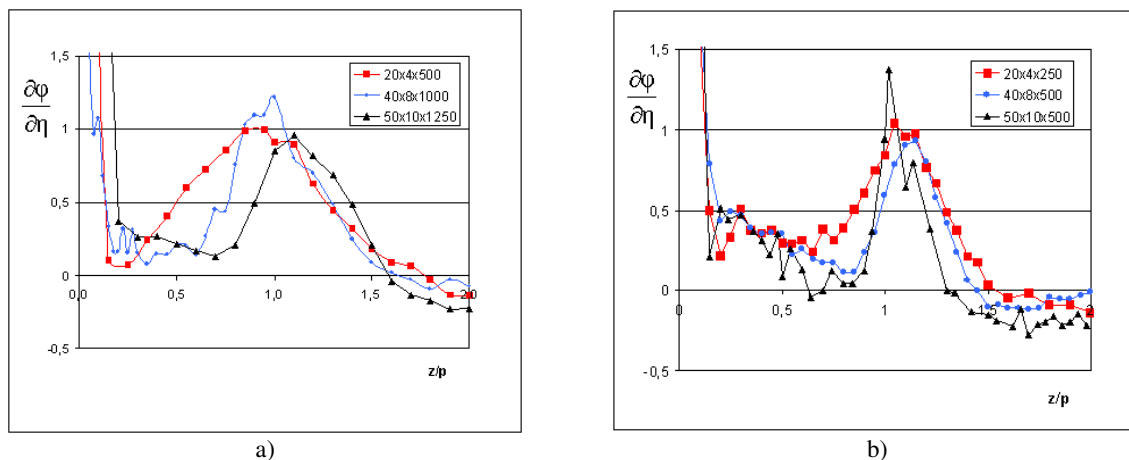
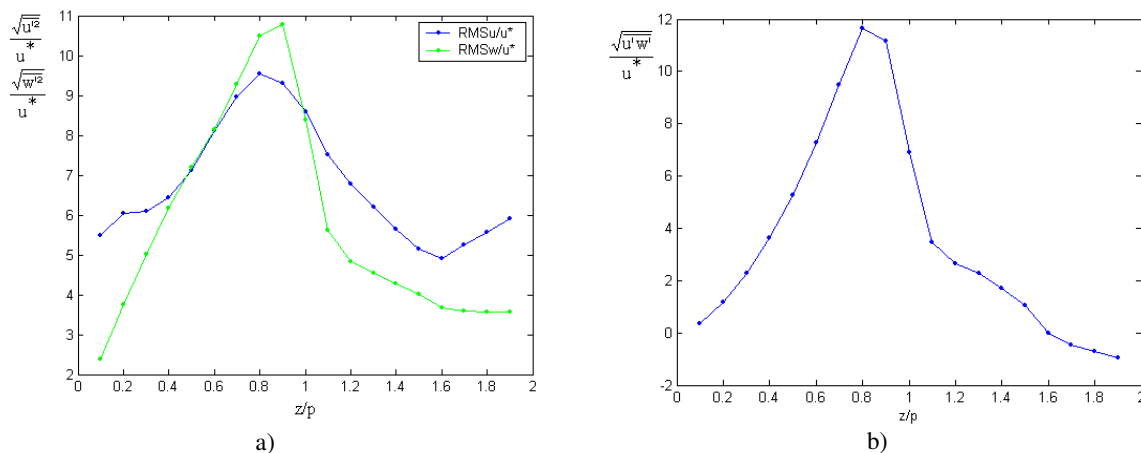


Figura 3 – Gradiente dos perfis de velocidade. a) seção de testes, n°:1, 2 e 3. b) seção de testes, n°: 4, 5 e 6.

As figuras 4, 5 e 6, mostram a distribuição das quantidades flutuantes,  $u'$ ,  $w'$  e o termo cruzado  $\overline{u'w'}$ . Os dados foram adimensionalizados pela tensão de cisalhamento na parede lateral, em forma de velocidade de fricção,  $u^*$ . Todas as medições se deram a partir de 2 mm da parede lateral e estenderam-se até o dobro do valor da profundidade.

De forma geral, nas seções mais curtas, 4, 5 e 6, a distribuição de tensões é bastante localizada junto a borda, possuindo valores menores comparados com seções mais longas, 1, 2 e 3. Nestas seções o máximo valor das tensões turbulentas esta localizado no canal principal e não dentro da fenda.

No entanto, independentemente do comprimento das seções, a magnitude das tensões turbulentas parece ser uma função da largura da fenda, “d”, principalmente o valor rms das flutuações de velocidade na componente “w”, que cresce com a redução da largura da fenda e alcança um valor maior que a componente “u” somente na seção mais estreita, onde  $d = 4$  mm. Os picos de tensões turbulentas junto a borda das placas, bem como sua distribuição ao longo da linha de simetria, condizem qualitativamente com os resultados obtidos por Meyer e Rehme, 1994 e Biemüller et al. 1996, ou seja, picos de tensões turbulentas junto a borda das placas e o progressivo decrescimento destas quantidades em direção ao canal principal.



a)

b)

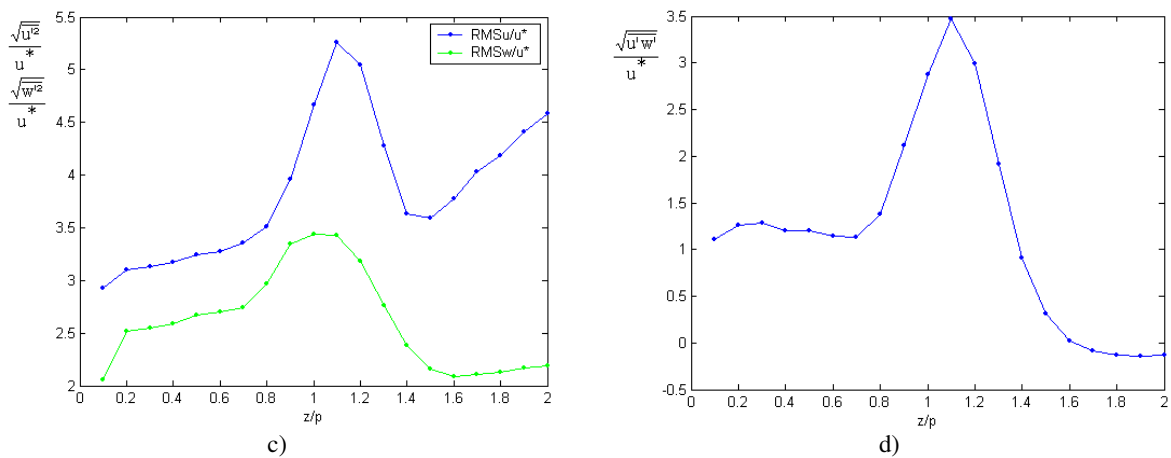


Figura 4 – Valores RMS das flutuações de velocidade e tensões turbulentas como uma função da posição ao longo da linha de medição. Seção de testes 20 x 4 x 500, “a” e “b”. Seção de testes 20 x 4 x 250, “c” e “d”.

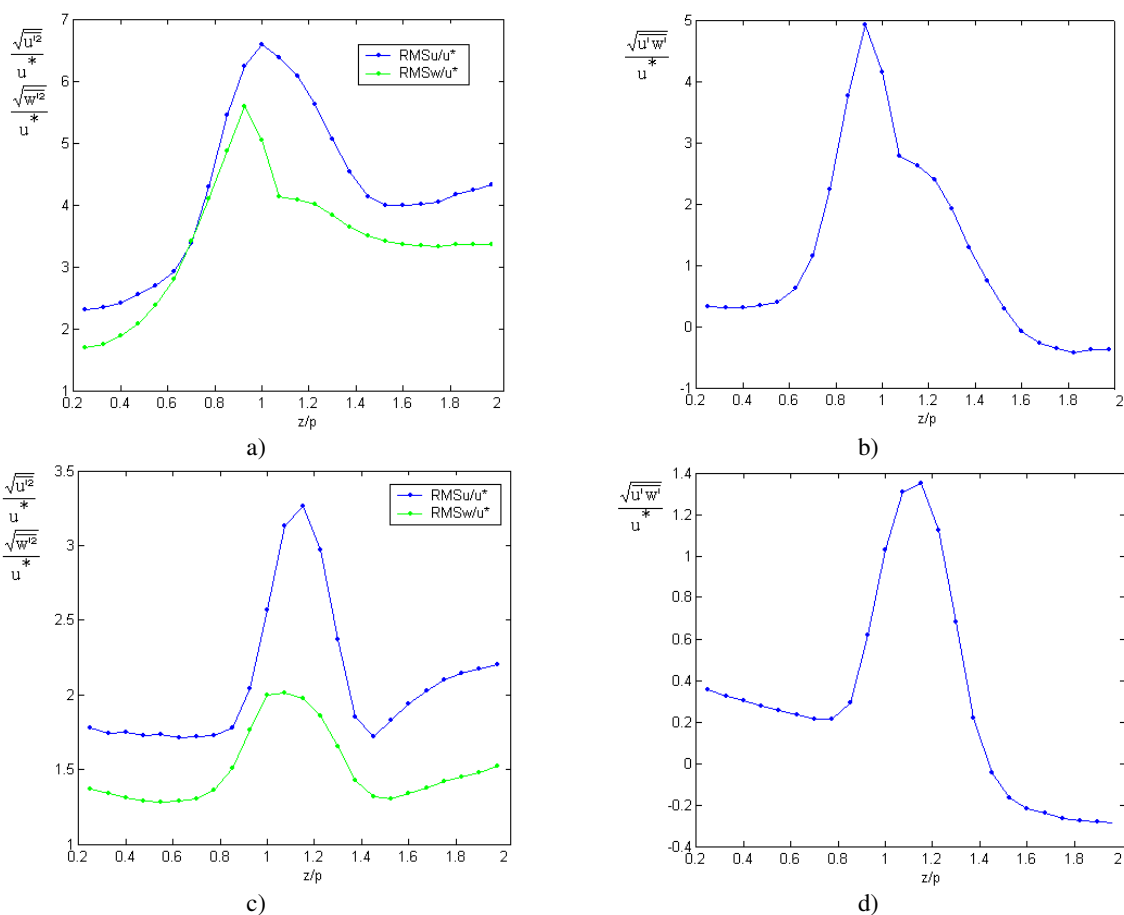


Figura 5 – Valores RMS das flutuações de velocidade e tensões turbulentas como uma função da posição ao longo da linha de medição. Seção de testes 40 x 8 x 1000, “a” e “b”. Seção de testes 40 x 8 x 500, “c” e “d”.

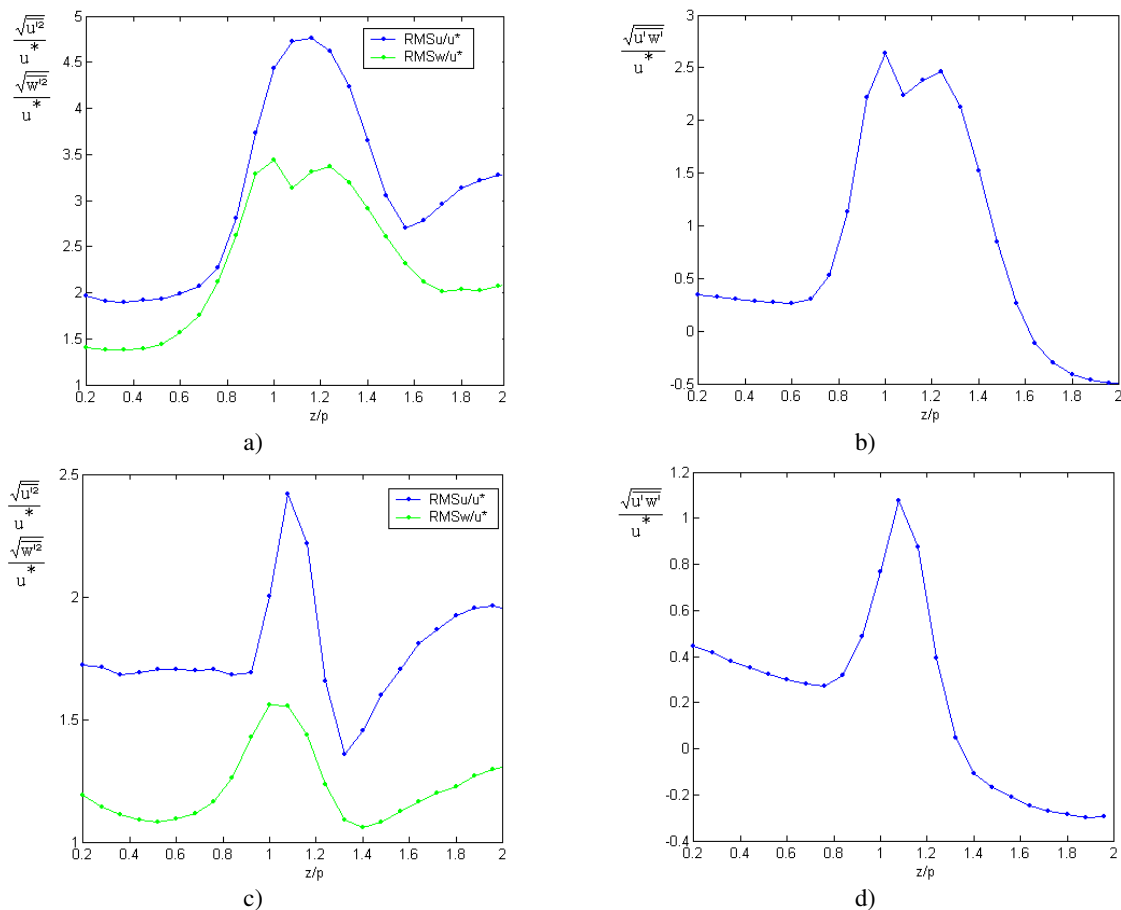


Figura 6 – Valores RMS das flutuações de velocidade e tensões turbulentas como uma função da posição ao longo da linha de medição. Seção de testes 50 x 10 x 1250, “a” e “b”. Seção de testes 50 x 10 x 1250, “c” e “d”.

### 3.2. Pulsões do Escoamento

Em todos os perfis de velocidade mostrados na fig. 2, os efeitos viscosos dentro da fenda são importantes na redistribuição do escoamento ao longo da linha de simetria. Na fig. 3(b), pode-se observar o início da formação de duas camadas com velocidades distintas, uma camada de baixa velocidade (dentro da fenda) e outra com alta velocidade (dentro do canal principal) culminando na fig.3(a). Entre elas existe uma camada onde o escoamento é cisalhante e como tal pode estar sujeita a instabilidades, tais como as instabilidades de Kelvin-Helmholtz, por exemplo, ou outro tipo de instabilidade, estas características também são reportadas por Soldini et al., 2004, simulando numericamente o escoamento de água em um canal trapezoidal.

A equação de Orr-Sommerfeld, eq. (1), permite determinar se um certo escoamento é susceptível ou não a instabilidade, no entanto a formulação diz respeito a instabilidades em escoamentos laminares, que podem ser amortecidas, amplificadas ou neutras, e dependendo do caso podendo levar o escoamento ao estado turbulento. O apóstrofo, na eq. (1), indica o grau da derivada e “v” é a função amplitude.

$$\alpha(U - c)(v'' - \alpha^2 v) - U''\alpha v = \frac{i}{\text{Re}} \left( v^{iv} - 2\alpha^2 v'' + \alpha^4 v \right) \quad (1)$$

onde:

$U$  = é a velocidade média na direção axial,  $U=f(z)$ ;

$c$  = é a velocidade de onda;

$i = \sqrt{-1}$ ;

$\text{Re}$  = número de Reynolds.

$\alpha$  = amplitude das instabilidades, pode ser maior que zero, menor que zero ou igual a zero.

Em problemas de instabilidade onde o número de Reynolds é muito alto, os termos viscosos podem ser descartados, transformando a equação de Orr-Sommerfeld na equação de Rayleigh, eq. (2). O teorema de Rayleigh diz que a

condição necessária para a instabilidade de um perfil de velocidade é que dentro do domínio exista um ponto de inflexão.

$$\alpha(U - c)(v'' - \alpha^2 v) - U'' \alpha v = 0 \quad (2)$$

A partir de então, Fjørtoft derivou um segundo teorema, no qual a condição necessária para que um perfil de velocidade se desestabilize é a existência de um ponto de inflexão no seu domínio e que o perfil satisfaça a eq. (3)

$$(U - U_s)U'' < 0 \quad (3)$$

onde,  $U_s$  é a velocidade do ponto de inflexão e  $U''$  é a derivada de segunda ordem da função  $u(z)$ . No entanto isto é somente uma condição necessária e não suficiente para que o perfil de velocidades se desestabilize e é utilizada na teoria de transição de escoamentos no estado laminar para turbulento. Portanto, segundo Mendonça, 2003 se  $U$  é uma função crescente de  $z$ , então:

$$z > z_s \rightarrow U > U_s \Rightarrow U'' < 0 \quad (4)$$

$$z < z_s \rightarrow U < U_s \Rightarrow U'' > 0 \quad (5)$$

as eq. (4) e (5) são verificadas para diferentes regiões do perfil de velocidade,  $z_s$  indica o ponto onde o perfil de velocidade inflexiona.

As figuras 7(a) e (b) mostram o perfil de velocidade axial e a aplicação do teorema de Fjørtoft para a seção 20 x 4 x 500. Os pontos em vermelho na fig. 7 (a) mostram seus pontos de inflexão. O primeiro ponto de inflexão diz respeito a distribuição de velocidade governada pela tensão de cisalhamento na parede, até  $z/p=0.25$ , e esta bem representada na fig. 3(a). Na fig. 7(b) pode-se observar que a eq.(3) é negativa para quase todo o domínio, exceto nas proximidades da borda e na região onde a tensão de cisalhamento na parede governa a distribuição de velocidade. No entanto para todos os outros perfis de velocidade a eq. (3), quando plotada contra  $z/p$  possui uma distribuição distinta, alternado valores positivos e negativos, sem predominância de um modo ou outro.

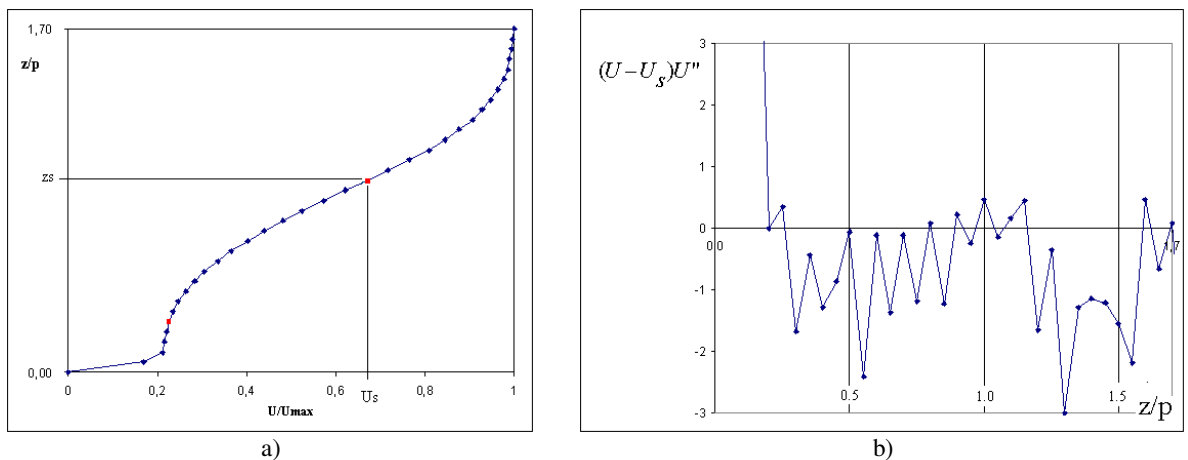


Figura 7 – Perfil de velocidade ao longo da linha de medição e a aplicação do Teorema de Fjørtoft.

A análise das flutuações de velocidade no espaço de Fourier é mostrada nas figuras 8 a 11 a posição onde foram tomadas as séries de velocidade foram adimensionalizadas pela profundidade das placas, dimensão “p”, as funções autoespectrais das componentes axial e transversal de velocidade são mostradas nas cores azul e verde, respectivamente. A frequência é mostrada de forma adimensional em função do número de Strouhal, conforme eq. (6).

De maneira geral nas seções menores, 4, 5 e 6, não foram encontrados indícios de estruturas coerentes, os auto espectros de flutuação de velocidade são bastante semelhantes para as mesmas posições, com valores de energia mais altos para as componentes axiais do que nas componentes transversais de flutuação de velocidade e sem qualquer pico característicos. Sendo este resultado bastante surpreendente quando confrontado com os estudos apresentados por Meyer e Rehme, 1996 e Guellouz e Tavoularis, 2000, que afirmam em seus trabalhos que a região da fenda é governada por estruturas coerentes.

Nas seções 1, 2 e 3, onde a relação entre o comprimento da seção “L” e sua outras grandezas “p” e “d” são maiores os auto-espectros de flutuação de velocidade apresentam picos característicos, todos marcados com uma seta, no entanto estes tendem a desaparecer com o aumento das dimensões “p” e “d”, tornado-se bastante fraco como mostra a fig. 10 (a).

A análise espectral da componente axial de flutuação de velocidade mostra somente um indício de pico na seção 3, fig. 8 (a), com características distintas daquelas encontradas na componente transversal, como uma largura de banda

maior e uma frequência característica situada em uma outra posição, desaparecendo por completo nas outras seções estudadas.

É importante notar que os autoespectros de flutuação de velocidade mostrados nas fig. 8(a), 9(a) e 10 (a), são tomados para posições relativas diferentes dentro da fenda, pois as medições mostraram que a periodicidade nas séries de velocidade, tomadas na borda da fenda, é fracamente detectada a medida que as dimensões “p” e “d” crescem. Enquanto nas seções 1 e 2 os indícios de estruturas coerentes nos autoespectros apresentam-se bastante localizados próximos a borda, na seção 3 é diferente, a característica periódica das flutuações de velocidade pode ser vista ao longo da fenda, desde  $z/p= 0,30$  até  $z/p= 1,10$ , e o numero de Strouhal se mostra invariável com a posição, conforme visto na fig. 11.

Meyer e Rehme, 1996, realizaram medições de flutuações de velocidade neste mesmo tipo de canal, sendo proposto a construção de um número de Strouhal, utilizando a raiz quadrada do produto das dimensões “p” e “d”, a velocidade da borda,  $U_e$ , e uma frequência característica,  $f$ , eq. (6). Os resultados mostraram para este tipo de canal uma frequência adimensional em forma do número de Strouhal, situada em 0,08, com um desvio padrão de 0,01.

Pode-se notar que principalmente na seção n° 03, fig. 8(a), o número de Strouhal proposto pelos autores prediz relativamente bem a frequência esperada, para o presente trabalho,  $Str= 0,06$ .

Quanto às seções n° 01 e 02, seus espectros apresentam diferentes características. Na seção n° 01, fig. 10(a), o pico no autoespectro praticamente não aparece, no entanto, o espectro da flutuação de velocidade da componente transversal é bastante diferente daquele mostrado na componente axial.

Outra forte discrepância, ocorreu na seção de testes n° 02, na qual as escalas utilizadas na adimensionalização da frequência forneceram um valor de Strouhal,  $Str= 0,02$ , sendo mais que no dobro do que aquele esperado pela correlação entre as escalas de velocidade e comprimento.

$$Str = \frac{f \sqrt{pd}}{U_e} \tag{6}$$

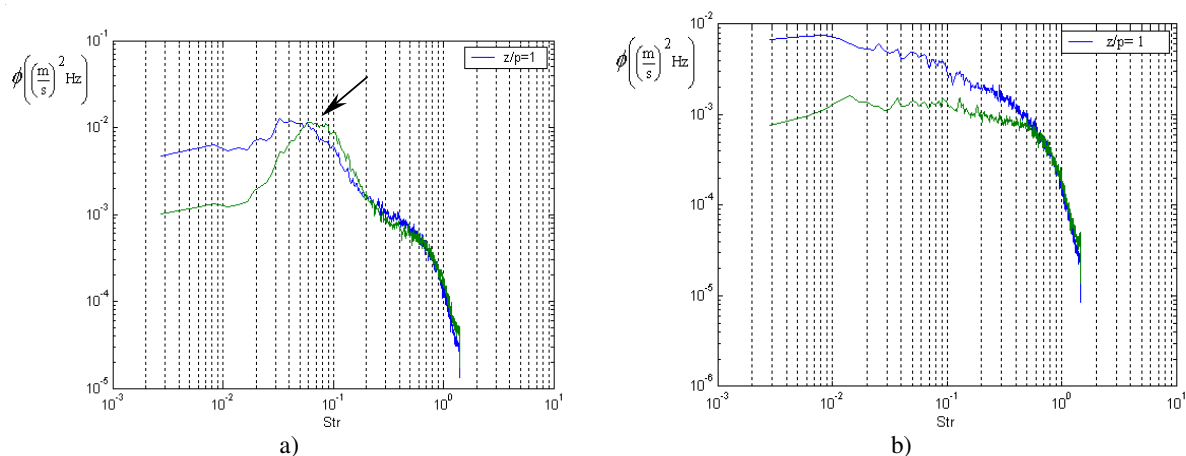


Figura 8 – Densidades autoespectrais das componentes axial e transversal de flutuação de velocidade para a seção de testes 20 x 4. a) L= 500 mm. b) L= 250 mm.

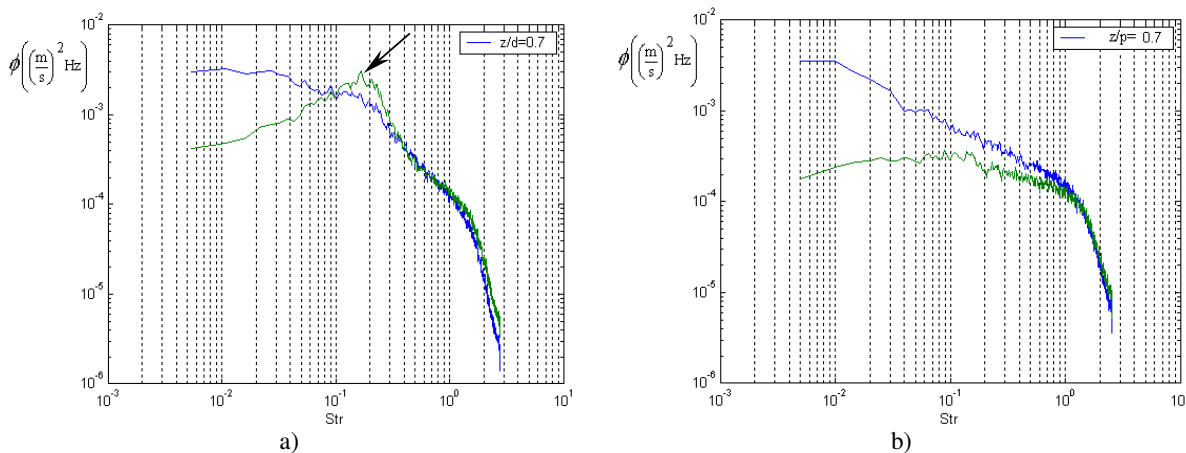


Figura 9– Densidades autoespectrais das componentes axial e transversal de flutuação de velocidade para a seção de testes 40 x 8. a) L= 1000 mm. b) L= 500 mm.



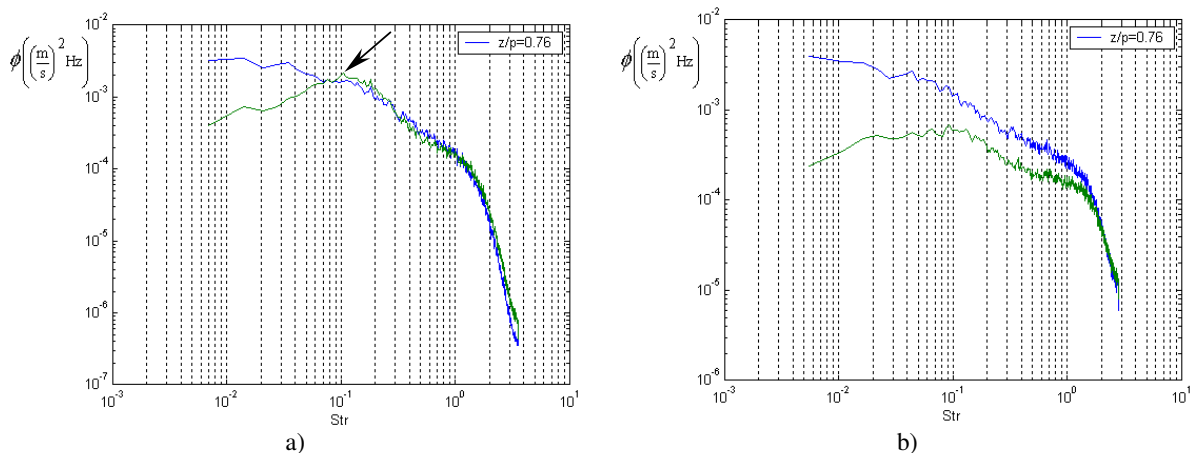


Figura 10– Densidades autoespectrais das componentes axial e transversal de flutuação de velocidade para a seção de testes 50 x10. a) L= 1250 mm. b) L= 500 mm.

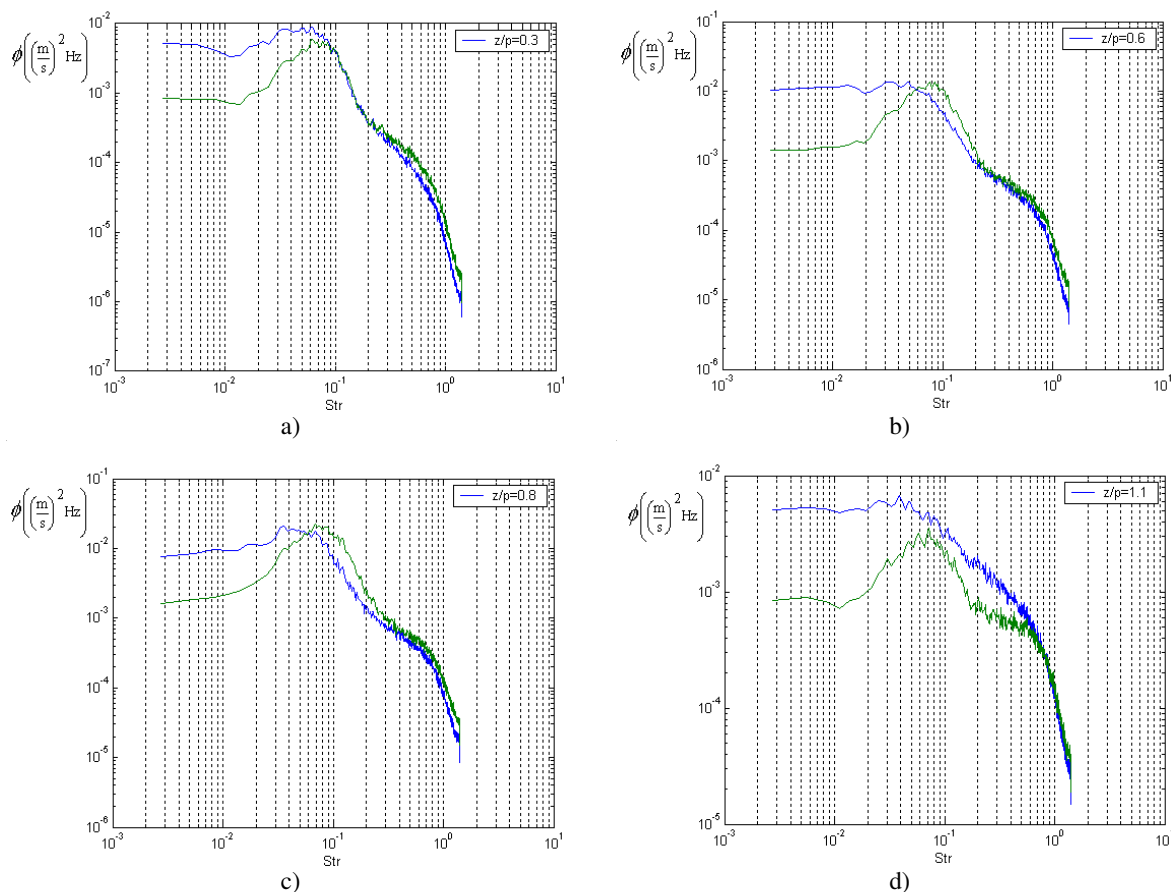


Figura 11– Densidades autoespectrais das componentes axial e transversal de flutuação de velocidade para a seção de testes 20 x 4 x 500. a) z/p= 0,30. b) z/p= 0.60. c).z/p= 0,80. d) z/p= 1.10.

#### 4. Conclusões

Este trabalho apresenta um estudo experimental da distribuição de velocidade e três das seis tensões de Reynolds ao longo da linha de simetria de uma fenda, conectada a parede lateral de um canal. O objetivo deste trabalho é investigar a presença de pulsações do escoamento neste tipo de canal, com um pequeno comprimento de entrada, bem como determinar a influencia dos parâmetros geométricos de seção de testes na detecção destas estruturas, ou até, em sua existência.

De maneira geral os resultados aqui contidos estão de acordo com outros trabalhos, mostrando que em canais compostos, onde há uma região estreita conectada a um canal principal, existe uma distribuição e um aumento anormal das tensões de Reynolds na fronteira dos sub-canais. A investigação dos perfis de velocidade revelou uma forte influência das características geométricas da seção em sua formação, gerando um escoamento altamente cisalhante entre uma camada de menor velocidade (dentro da fenda) e maior velocidade (canal principal) sujeita a instabilidades.

Embora todos os perfis possuíssem a condição necessária para instabilidade somente em alguns foram detectados picos de frequência em seus autoespectros, porém o presente estudo não é abrangente o suficiente para concluir se estas instabilidades não existem ou apenas não puderam ser detectadas nas demais geometrias, tornando prematura a afirmação de que estas estruturas “existem para qualquer fenda longitudinal, ranhura em uma parede ou uma fenda conectando dois subcanais.” Segundo Guellouz e Tavoularis, 2000, a ausência de picos nos auto-espectros não necessariamente contradiz a presença de pulsações do escoamento, para fendas mais largas as características periódicas dos sinais de flutuação de velocidade podem se obscurecidas pelos processos médios.

O parâmetro adimensional,  $p/d$ , se mostra bastante impreciso na predição do comportamento dinâmico do escoamento, bem como na distribuição de velocidades médias, já que tais características parecem depender mais da geometria como um todo do que de uma relação entre a profundidade e a largura da seção.

Quanto a formulação de um número de Strouhal, relacionando as grandezas de velocidade e comprimento dadas na eq. (6), as conclusões são as mesmas encontradas por Meyer e Rehme, 1996, ou seja, mostram que a escolha das escalas de velocidade e comprimento representativas do escoamento ainda não é uma questão resolvida.

## 5. 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.

## 6. 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.
- Guellouz, M.S. and Tavoularis, S., The structure of the turbulent flow in a rectangular channel containing 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.
- Mendonça, M. T., 2003. Estabilidade de escoamentos lineares: Teoria Liner, vol. 2. Editores: A. Silveira Neto e S. S. Mansur, pp.247-300, ABCM, Rio de Janeiro, RJ.
- 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 through channels with longitudinal slots or fins, 10<sup>th</sup> 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: 10<sup>o</sup> 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*. 6<sup>th</sup> 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.
- Wu, X. and Trupp, A. C., Spectral measurements and mixing correlations in a simulated rod bundle subchannels, *Int. J. Heat Transfer*, **37**, 1277-1281, 1994.

## **FLOW PULSATIONS IN SHORT COMPOUND CHANNELS**

J. N. V. Goulart

PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

[jhongoulart@yahoo.com.br](mailto:jhongoulart@yahoo.com.br)

S. V. Möller

PROMEC – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

[svmoller@ufrgs.br](mailto:svmoller@ufrgs.br)

### **Abstract**

Hot-wire anemometry technique was used to investigate the flow pulsations in short compound channels. The geometry studied consists in two parallel plates with deep “p” and width “d”, connected to a wider channel. Three different test sections with the same p/d ratio were studied. The length “L” could be changed. The purpose of this paper is to investigate the presence of large-scale structures in this kind of channel flow and how the geometric parameters influence their formation. The results show different velocity profiles and Reynolds stress distribution when the geometrical parameters were changed, as well the strong dependence between axial velocity profile shape and the flow pulsation detection, suggesting a relationship between flow pulsations and axial velocity profiles instabilities.

Keywords: coherent structures, compound channels, hot wire probes