

## 4 Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais realizados na seção de testes construída. Como mencionado na introdução, o foco do presente trabalho foi o estudo da influência da rotação sobre a queda de pressão e os campos de velocidade no espaço anular com escoamento axial.

Os resultados obtidos da queda de pressão no espaço anular são apresentados na forma de fatores de atrito em função dos números de Reynolds rotacional e axial. Para os campos de velocidade, são mostrados os resultados da influência da rotação do cilindro interno nos campos de velocidade instantâneos assim como nos perfis de velocidade axial médios.

Um total de 95 experimentos foram conduzidos na seção de testes, sendo 50 experimentos para a queda de pressão e 45 experimentos para os campos de velocidades.

Antes da discussão dos resultados obtidos são apresentados resultados voltados para a qualificação da seção de testes construída.

### 4.1 Qualificação da Seção de Testes

A seção de testes, projetada e construída conforme descrito em detalhes no Capítulo 2, foi qualificada através da realização de experimentos para a determinação do fator de atrito e medição dos perfis de velocidade para o caso de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido através da região anular sem rotação do cilindro interno. Esta configuração foi escolhida por permitir a comparação com dados da literatura ou soluções analíticas. Os testes realizados abrangeram os regimes de escoamento laminar, de transição laminar-turbulento e o início do regime turbulento.

### 4.1.1

#### Queda de Pressão e Fator de Atrito

O processo de validação da seção de testes foi iniciado pela análise dos resultados da queda de pressão ao longo da região anular e do fator de atrito para escoamento hidrodinamicamente desenvolvido sem rotação do cilindro interno. A análise da distribuição axial da pressão revela o grau de desenvolvimento do escoamento, enquanto o fator de atrito fornece uma medida quantitativa da qualidade da seção de teste construída e dos procedimentos experimentais empregados.

Para o regime laminar, a qualificação da seção de testes foi feita através da comparação com resultados analíticos disponíveis para esta configuração. Para o regime turbulento foi realizada uma comparação com os resultados do diagrama de Moody, representados pela expressão sugerida por Miller e apresentada em Fox & McDonalds (1998). Nesta comparação foi utilizado o diâmetro hidráulico da seção anular.

Informações da literatura (Rohsenow & Hartnet (1982)) indicam que a dependência do fator de atrito com a razão de raios não é forte. Além disso, na mesma referência, é recomendado que o fator de atrito para a escoamento turbulento hidrodinamicamente desenvolvido na região anular seja avaliado utilizando os resultados do diagrama de Moody acrescidos de 10%, com o número de Reynolds baseado no diâmetro hidráulico da seção de escoamento.

O procedimento experimental adotado para determinar o fator de atrito hidrodinâmico foi descrito no Capítulo 2. Este procedimento era baseado na determinação do gradiente de pressão na região de escoamento desenvolvido. A figura (4.1), apresenta um conjunto de medições típicas para a variação da pressão ao longo da seção de testes. O caso apresentado na figura corresponde a um número de Reynolds de 5021 e rotação do cilindro interno nula. A diferença de pressão em relação à primeira tomada de pressão,  $p(0)$ , dada em Pascal, é apresentada em função da coordenada axial ao longo da seção de testes, dada em metros.

Uma observação da figura (4.1) mostra que a distribuição de pressão no escoamento apresenta um comportamento linear desde uma posição muito próxima à entrada da região anular, para este número de Reynolds, indicando um rápido desenvolvimento do escoamento. A equação de uma reta foi ajustada aos dados de pressão em função da coordenada axial, através de um procedimento baseado no método dos mínimos quadrados. A equação da curva obtida é apresentada no interior do gráfico. O coeficiente angular da reta representa, em módulo, o gradiente de pressão,  $\Delta P/L$ ,

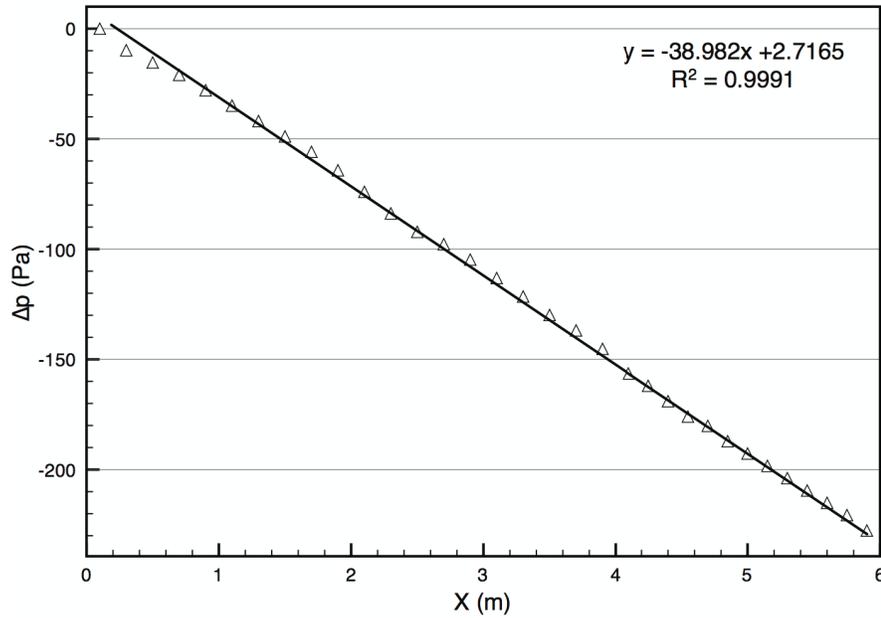


Figura 4.1: Distribuição de pressão ao longo da seção de testes para  $Re = 5021$ , sem rotação do cilindro interno.

utilizado no cálculo do fator de atrito,  $f$ . Assim, o fator de atrito foi calculado pela equação abaixo, já apresentada no capítulo 2,

$$f = \frac{2(\Delta P/L)D_H}{\rho(Q/A)^2} \quad (4-1)$$

O número de Reynolds foi avaliado baseado nas propriedades da água,  $\rho = 998 \frac{kg}{m^3}$  e  $\mu = 1 \times 10^{-3} \frac{kg}{ms}$ . Para todos os valores de número de Reynolds investigados a distribuição de pressão apresentou um comportamento linear, indicando que o desenvolvimento hidrodinâmico foi alcançado em todos os testes.

A tabela (4.1) apresenta os resultados para o fator de atrito obtidos para a faixa de número de Reynolds investigada. A tabela (4.1) apresenta também os valores da literatura usados para validação dos experimentos. Para o regime de escoamento laminar foi utilizada a solução analítica apresentada, por exemplo, em White (1978),

$$f = \frac{\xi 64}{Re_{Dh}} \quad (4-2)$$

onde,

$$\xi = \frac{(r_e - r_i)^2 (r_e^2 - r_i^2)}{(r_e^4 - r_i^4) - \frac{(r_e^2 - r_i^2)^2}{\ln \frac{r_e}{r_i}}} \quad (4-3)$$

Lundgren *et al.* também apresentam resultados de  $fRe$  em função da razão de raios para regime laminar. Uma comparação entre os dois resultados analíticos foi feita mostrando que estes diferem de menos de 1%.

Para os regimes de transição e turbulento, foram utilizadas duas alternativas que produziram resultados coincidentes dentro de uma faixa de 1%. A correlação de Miller indicada em Fox & McDonald, (1998), é representada pela expressão (4-5).

$$f = 0,25 \left[ \log \left( \frac{e/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (4-4)$$

,onde  $e$  é a rugosidade e  $D$  é o diâmetro da tubulação.

Para um tubo liso,  $e = 0$ , assim:

$$f = 0,25 \left[ \log \left( \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right) \right]^{-2} \quad (4-5)$$

Os valores previstos pela expressão (4-5) devem ser acrescidos de 10%, conforme sugerido por Rohsenow *et al* (1982), para um espaço anular, já que a correlação de Miller é para um tubo circular.

A expressão de Jones & Leung (1981) citada em Escudier & Gouldson (1995) é uma expressão transcendental para o fator de atrito para escoamento em regiões anulares sem rotação. A expressão é válida para razão de raios igual a 0,5. Uma comparação entre as previsões das duas alternativas para estimativa do fator de atrito apresenta uma ótima concordância, com desvios nunca superiores a 1% para a faixa de parâmetros relevantes para o presente estudo. Os dados apresentados na tabela (4.1) foram calculados pela expressão de White (1978), para regime laminar e a correlação de Miller para regime de transição e turbulento.

Tabela 4.1: Comparação entre fatores de atrito hidrodinâmicos.

Re	$f$ medido	$f$ teórico	Diferença	Incerteza
663	0,1423	0,1444 eq(4-2)	1,44%	20,3%
980	0,1019	0,0977 eq(4-2)	4,35%	17,2%
1288	0,0742	0,0743 eq(4-2)	0,18%	24,5%
1577	0,0574	0,0607 eq(4-2)	5,95%	16,9%
1923	0,0505	0,0518 eq(4-5)	2,43%	15%
2556	0,0457	0,0457 eq(4-5)	2,60%	14,8%
3248	0,0416	0,0426 eq(4-5)	2,27%	14,6%
5021	0,067	0,0378 eq(4-5)	2,96%	14,8%
6847	0,0318	0,0345eq(4-5)	7,74%	15,3%
8456	0,0330	0,0325 eq(4-5)	1,84%	15,4%

A análise dos resultados apresentados na tabela (4.1) mostra que a seção de testes construída produz resultados confiáveis, com níveis aceitáveis de diferenças quando comparados com os resultados analíticos e menores do que aqueles sugeridos por Rohsenow & Hartnet (1982) para um espaço anular.

Os resultados apresentados na tabela (4.1) são reproduzidos na forma gráfica na figura (4.2). Nesta figura, o eixo das abscissas apresenta, em escala logarítmica, os valores de número de Reynolds axial investigados, e o eixo das ordenadas apresenta, também em escala logarítmica, os valores obtidos dos fatores de atrito sem a rotação do cilindro interno. A figura também apresenta a barra da estimativa da incerteza no fator de atrito, onde esta estimativa é apresentada no Apêndice B. A linha cheia da figura apresenta os resultados da equação (4-2) e a linha pontilhada são os resultados da equação (4-5).

A alta incerteza no fator de atrito está associada a escolha do medidor de vazão e do medidor de pressão.

Após a análise dos resultado obtidos para a configuração sem rotação do cilindro interno a seção de testes e os procedimentos experimentais adotados foram considerados qualificados.

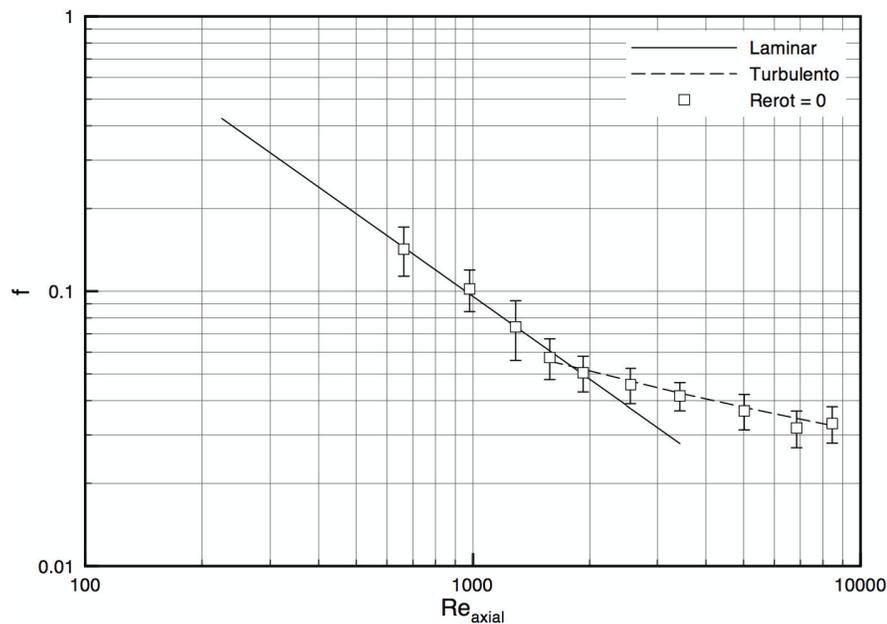


Figura 4.2: Comparação entre fatores de atrito medidos e da literatura para  $Re_{rot} = 0$ . Dados da literatura de White (1978) e Miller de acordo com Fox & McDonald (1998). Razão de raios,  $\eta = 0,64$ .

### 4.1.2

#### Perfis de Velocidade na Região Desenvolvida

Uma verificação mais rigorosa da qualidade da seção de testes e dos procedimentos experimentais foi realizada comparando-se resultados para os perfis de velocidade axial na região anular, para a condição de escoamento hidrodinamicamente desenvolvido sem rotação do cilindro interno. Os resultados aqui apresentados foram obtidos com a utilização da técnica de Velocimetria por Imagem de Partícula (PIV), descrita no capítulo 3.

As medições dos perfis axial de velocidade foram feitas no plano meridional do espaço anular, como descrito na seção 2.4 do Capítulo 2. Cuidado especial foi tomado no posicionamento do plano do laser no plano meridional.

A técnica de correlação usada foi a técnica de Hart (1998), descrita no capítulo 3, com o primeiro passo (passo preditor) com uma janela de interrogação de 96x96 pixels e 50% de sobreposição de janela, e o segundo passo (passo final) de 64x64 pixels com sobreposição de 50% obtendo uma resolução espacial de 0,41mm. Essa técnica recursiva, descrita no capítulo 3, produz incertezas menores, pois o primeiro passo é usado para deslocar, em valores inteiros, as janelas de interrogação do segundo passo, já que o erro sistemático e o erro aleatório são proporcionais ao deslocamento das partículas na janela. Para a determinação dos deslocamentos com resolução sub-pixel foi utilizado o ajuste Gaussiano do pico de correlação.

#### Perfis de Velocidade para Regime de Escoamento Laminar

A figura (4.4) apresenta os perfis de velocidade axial para os valores de números de Reynolds em regimes de escoamento laminar investigados, sem rotação do cilindro interno. Na figura, a ordenada representa a velocidade axial adimensionalizada pela velocidade média na seção transversal do espaço anular. A abscissa representa a coordenada radial medida à partir da parede externa do espaço anular, adimensionalizada pela metade do espaço anular,  $\delta = \frac{r_e - r_i}{2}$ . Neste sistema de coordenadas,  $y/\delta$  representa a posição a partir da parede externa da região anular, onde  $y/\delta = 0$  é a parede do cilindro externo e  $y/\delta = 2$  a parede do cilindro interno. A figura (4.3) ilustra o sistema de coordenadas utilizado.

Na figura (4.4) também é apresentado, para fins de comparação, o perfil de velocidade obtido da solução analítica para a região anular.

Pode-se observar na figura (4.4) que há uma excelente concordância entre os perfis experimentais e o perfil analítico. Nota-se também a perfeita

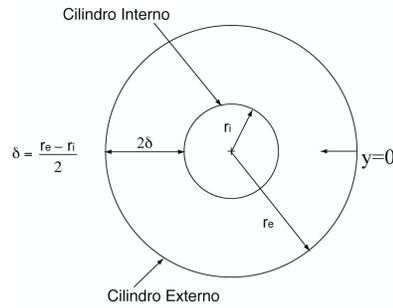


Figura 4.3: Ilustração da coordenada adimensional radial utilizada.

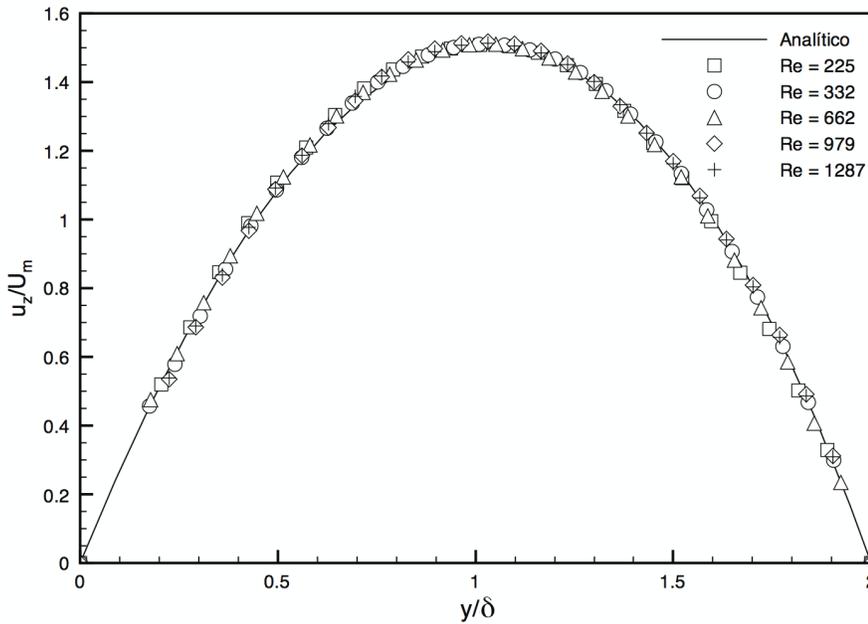


Figura 4.4: Perfis de Velocidade Axial Média para Regime de Escoamento Laminar. Razão de raios,  $\eta = 0,64$ .

concordância entre perfis de velocidade adimensionais medidos para diferentes valores do número de Reynolds axial, como esperado para escoamentos laminares.

Deve-se mencionar que os perfis de velocidade apresentados na figura (4.4) foram obtidos à partir da média de 300 campos de velocidades medidos com a técnica de PIV. Nota-se que os gradientes de velocidade próximos às paredes foram muito bem avaliados pela janela de interrogação de  $64 \times 64$  pixels com sobreposição de 50% utilizada.

Como uma forma adicional de qualificação da seção e dos procedimentos de teste foi realizada uma integração numérica dos perfis de velocidade na área de seção transversal do espaço anular. O resultado desta integração foi comparado com as medidas de vazão obtidas no rotâmetro. A tabela (4.2) apresenta os resultados destas comparações.

Tabela 4.2: Comparação entre as Vazões Calibradas e Vazões Integrando o Perfil de Velocidade para Regime de Escoamento Laminar

Vazão no Rotâmetro (L/h)	Vazão Integrada (L/h)	Diferença	Incerteza do Rotâmetro
67	69	1,70%	3,27%
99	102	2,36%	3,14%
199	201	1,31%	0,83%
293	299	1,98%	0,74%
386	390	1,08%	0,88%

Pela tabela (4.2) nota-se que a diferença entre as vazões obtidas pelos dois métodos é bem pequena, cerca de 2%, mostrando que a técnica de PIV produz resultados confiáveis.

### Perfis de Velocidade para Regime de Escoamento Turbulento

A figura (4.5) apresenta os resultados para os perfis de velocidade axial medidos no espaço anular com a técnica de PIV, para o regime de escoamento turbulento. A adimensionalização da velocidade e o sistema de coordenadas utilizados são os mesmos descritos para o caso de escoamento laminar apresentado na figura (4.4). Também nas medições do escoamento turbulento, os perfis apresentados são resultados da média de 300 campos de velocidades instantâneos. Na figura (4.5) são apresentados perfis de velocidade axial para os quatro valores de números de Reynolds axial indicados. Além destes perfis, é apresentado, para fins de comparação, o perfil de velocidade para  $Re=8900$  obtido por meio de simulação numérica direta (DNS) por Chung *et al.* (2002). Note-se que no trabalho citado o número de Reynolds é um pouco mais elevado que o maior valor medido no presente experimento. Também, a razão de raios da simulação era igual a 0,5, diferente daquela do presente trabalho, que é  $\eta = 0,64$ .

Uma observação dos resultados da figura (4.5) mostra a tendência esperada de achatamento do perfil turbulento, à medida que o número de Reynolds aumenta. A comparação dos resultados medidos com aquele obtido por DNS pode ser considerada excelente. A pequena diferença pode ser atribuída ao número de Reynolds mais elevado da simulação.

Para o caso turbulento, foi realizada a comparação da vazão medida no rotâmetro com a integração do perfil de velocidade medidos na seção transversal do espaço anular. A tabela (4.3) apresenta os resultados desta

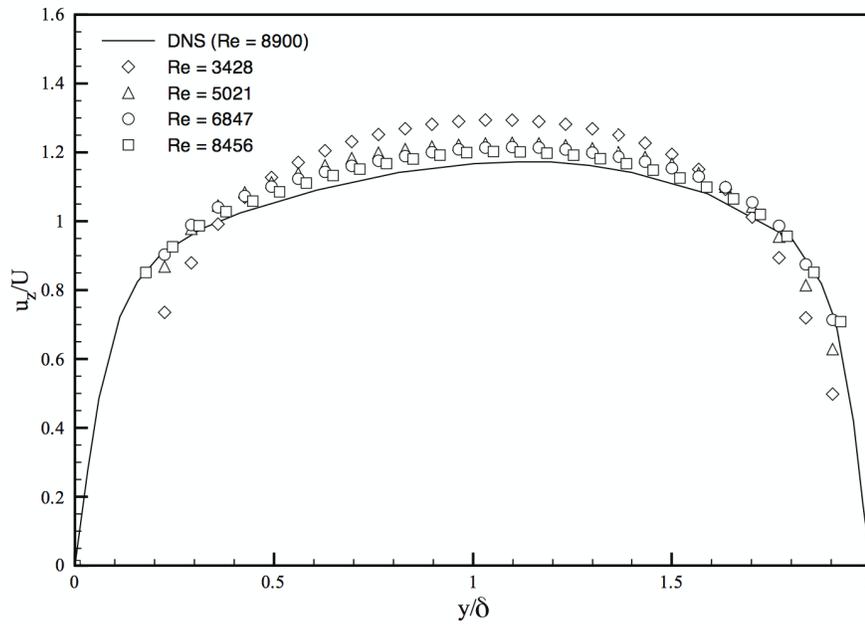


Figura 4.5: Comparação entre os Perfis de Velocidade Axial Média. Resultado de DNS para  $Re = 8900$  e razão de raios igual a 0,5 (Chung *et al.*, 2002).

comparação, que podem ser considerados excelentes dentro da faixa explorada por este trabalho.

Tabela 4.3: Comparação entre as Vazões Lidas no Rotâmetro e Vazões Integrando o Perfil de Velocidade para Regime de Escoamento Turbulento.

Vazão no Rotâmetro (L/h)	Vazão Integrada (L/h)	Diferença	Incerteza do Rotâmetro
1027	1005	2,08%	0,76%
1504	1506	0,17%	2,18%
2050	1983	3,30%	0,43%
2532	2491	1,62%	1,59%

## 4.2

### Efeito da Rotação do Cilindro Interno

Uma vez que a seção de testes foi considerada qualificada, foram realizados os ensaios programados visando a determinação do efeito da rotação do cilindro interno sobre a distribuição axial de pressão, na forma de fatores de atrito, e sobre os campos de velocidade.

### 4.2.1

#### Efeito da Rotação do Cilindro Interno na Queda de Pressão e Fator de Atrito

Os efeitos da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito hidrodinâmico para a seção anular serão apresentados nesta seção. A matriz de testes selecionada para a realização dos experimentos englobou valores do número de Reynolds axial desde 225 até 8348 e quatro valores de números de Reynolds rotacionais, 300, 500, 700 e 900.

A tabela (4.4) apresenta os resultados obtidos mostrando a influência da rotação sobre o fator de atrito. As propriedades da água utilizadas para o cálculo do fator de atrito foram  $\rho = 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  e  $\mu = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}$ .

Tabela 4.4: Efeito da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito.

Re	Fator de Atrito Hidrodinâmico, $f$				
	$\text{Re}_{rot} = 0$	$\text{Re}_{rot} = 300$	$\text{Re}_{rot} = 500$	$\text{Re}_{rot} = 700$	$\text{Re}_{rot} = 900$
663	0,1423	0,1782	0,1609	0,1954	0,2065
980	0,1019	0,1154	0,1458	0,1499	0,1861
1288	0,0742	0,0980	0,1152	0,1355	0,1365
1576	0,0574	0,0889	0,0959	0,1000	0,1177
1923	0,0505	0,0686	0,0827	0,0949	0,1034
2556	0,0457	0,0643	0,0697	0,0754	0,0760
3428	0,0416	0,0448	0,0560	0,0564	0,0614
5021	0,0367	0,0410	0,0419	0,0445	0,0450
6847	0,0318	0,0345	0,0378	0,0363	0,0379
8456	0,0330	0,0365	0,0360	0,0358	0,0367

Os resultados apresentados na tabela (4.4) podem ser melhor visualizados na forma gráfica apresentada na figura (4.6).

Na figura (4.6) o fator de atrito hidrodinâmico é apresentado em função do número de Reynolds axial para os quatro valores de Reynolds rotacional, além do caso sem rotação do cilindro interno que serve como base de comparação. As linhas retas são os resultados das soluções analíticas ajustadas para os fatores de atrito, descritas anteriormente. A variação abrupta no ângulo destas duas linhas retas distingue os regimes de escoamento laminar e turbulento. Deve-se ressaltar que os dados são apresentados em escala logarítmica.

Uma observação geral da figura (4.6) revela que o fator de atrito é fortemente influenciado pela rotação do cilindro interno, notadamente para os escoamentos com menores valores do números Reynolds axial. À medida

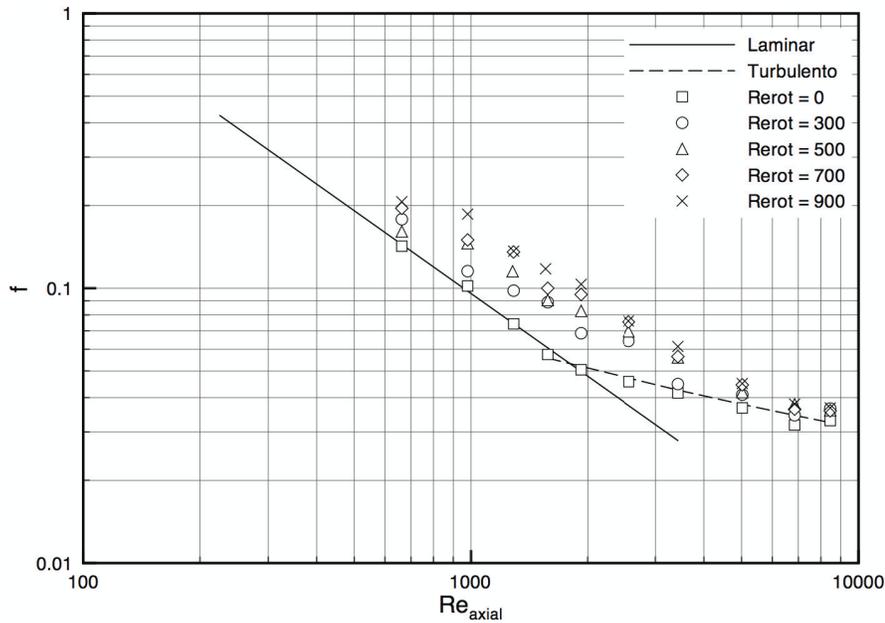


Figura 4.6: Efeito da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito.

que o número de Reynolds axial aumenta o incremento observado no fator de atrito é menor, mas ainda significativos.

Uma avaliação melhor da influência do Reynolds rotacional no fator de atrito pode ser realizada com o auxílio da tabela (4.5) e da figura (4.7), que apresenta em forma gráfica os dados da tabela (4.5). Na tabela assim como na figura, é apresentada a razão do fator de atrito com rotação pelo fator de atrito sem rotação,  $f/f_0$ , para as faixas de números de Reynolds axial e rotacional investigadas. Verifica-se nestas apresentações que, para o maior valor de Reynolds rotacional investigado,  $Re_{rot} = 900$ , o aumento no fator de atrito varia de 100% para Reynolds axial igual a 1576 a 10% para o maior valor de Reynolds estudado. Note que há uma mesma tendência para as curvas da figura (4.7) para todas os valores de Reynolds rotacionais investigados. As razões entre os fatores de atrito aumentam até valores de números de Reynolds axial próximos da transição laminar-turbulento e depois diminuem para maiores valores de Reynolds axial.

Na verdade, esta faixa decrescente de aumento de 100% a 10% é observada para todos os valores de Reynolds rotacional investigados, indicando que há uma relativa insensibilidade da magnitude do aumento no fator de atrito ao Reynolds rotacional.

A figura (4.8) mostra a comparação entre os resultados obtidos no presente trabalho e os dados de Escudier & Gouldson (1995). Os resultados obtidos por Escudier & Gouldson (1995) foram para uma razão de raios

Tabela 4.5: Efeito da Rotação do cilindro interno sobre o Fator de Atrito: Razão  $f/f_0$ .

Re	Razão entre fatores de atrito, $f/f_0$			
	$Re_{rot} = 300$	$Re_{rot} = 500$	$Re_{rot} = 700$	$Re_{rot} = 900$
663	1,252	1,131	1,374	1,451
980	1,132	1,430	1,470	1,825
1288	1,322	1,553	1,847	1,841
1576	1,549	1,672	1,743	2,051
1923	1,357	1,636	1,877	2,045
2556	1,406	1,524	1,650	1,663
3428	1,077	1,345	1,355	1,474
5021	1,118	1,142	1,214	1,227
6847	1,086	1,190	1,142	1,193
8456	1,104	1,090	1,083	1,109

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0421079/CA

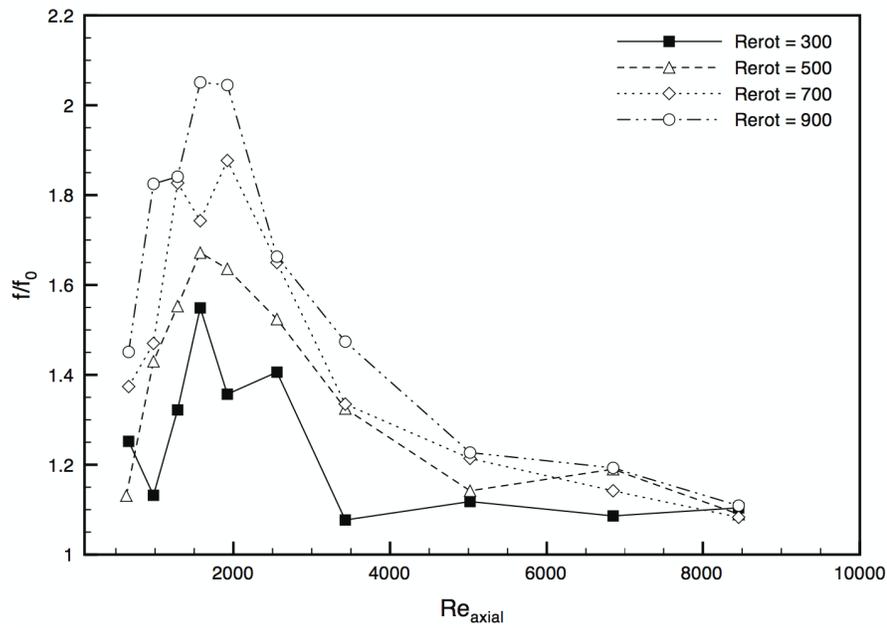


Figura 4.7: Efeito da rotação sobre o fator de atrito. Razão entre fator de atrito com rotação e sem rotação,  $f/f_0$ .

igual a 0,51. A concordância entre os resultados pode ser considerada muito boa, mostrando também que o fator de atrito não é muito influenciado para pequenas diferenças de razões de raios próximos.

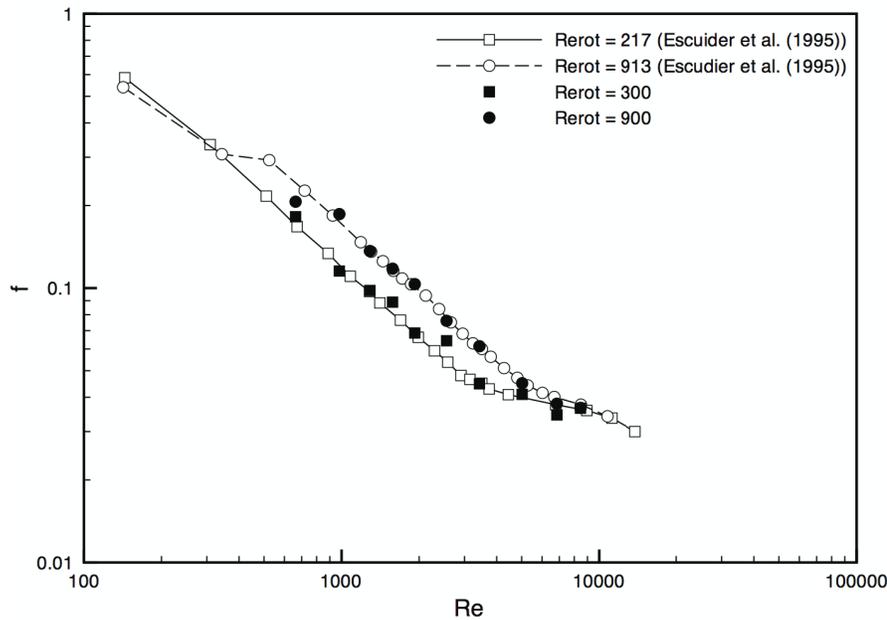


Figura 4.8: Comparação entre os resultados experimentais do presente trabalho com os dados de Escudier & Gouldson (1995).

#### 4.2.2

#### Efeito da Rotação do Cilindro Interno nos Campos de Velocidade

Nesta seção são apresentadas informações detalhadas sobre os campos de velocidade no espaço anular. A utilização da técnica de PIV para a obtenção de campos instantâneos de velocidade fornece uma riqueza de informações que não pode ser obtida por qualquer outra técnica experimental atualmente em uso. Se por um lado a abundância dos dados de velocidade produzidos é um fator positivo, a interpretação desta massa de dados torna-se uma tarefa complexa e muitas vezes limitada pela capacidade (memória de armazenagem) ou tempo de processamento e análise. Assim, no presente trabalho é apresentada apenas uma seleção das informações sobre os campos de velocidade obtidos. Há ainda um longo trabalho de investigação que pode ser realizado com os dados disponíveis o qual, por limitação de tempo, não pode ser finalizado, sendo ainda alvo de interpretação.

A tabela (4.6) apresenta a matriz dos ensaios conduzidos para os quais foram realizadas medições dos campos instantâneos de velocidade. Para cada valor do Reynolds axial foram estudados 4 valores dos Reynolds

rotacional, além do caso sem rotação do cilindro interno, já apresentados na seção 4.1.2 e utilizados na qualificação da seção de testes. Na tabela (4.6) é apresentada a razão  $Re_{rot}/Re_{axial}$  para cada caso investigado. A utilização desta razão para caracterizar o escoamento é sugerida no trabalho de Wereley & Lueptow (1999), representando a intensidade relativa entre efeitos centrífugos e aqueles relacionados à quantidade de movimento axial. Quando o valor desta razão é elevado, espera-se que os efeitos centrífugos dominem e que o escoamento seja caracterizado pela presença de vórtices. Quando este valor é baixo, espera-se a predominância de um escoamento axial na região anular.

Apesar do sistema de PIV utilizado nos experimentos ser capaz de realizar medições de campos de velocidade instantâneos com uma frequência de amostragem de até 15Hz, as medições foram realizadas em fase com a rotação do cilindro interno. Isto foi necessário devido à presença de um pequeno empeno no cilindro interno, o que provocou uma pequena variação na dimensão da região anular. Para garantir a medição do escoamento em região com a mesma dimensão, optou-se por sincronizar os pulso do laser com a rotação do cilindro interno. Assim, as medições eram realizadas em um plano meridional, a cada revolução do cilindro. Este procedimento impediu o registro da evolução temporal detalhada das estruturas do escoamento (pelo menos a uma taxa máxima de 15Hz). Para cada configuração estudada foram adquiridos 150 pares de imagens produzindo, após o devido processamento, igual número de campos instantâneos de velocidade.

Tabela 4.6: Razão entre Valores de Reynolds Rotacional e Reynolds Axial Investigados.

	$Re_{rot}$			
$Re_{axial}$	300	500	700	900
225	1,33	2,22	3,11	4,00
332	0,9	1,51	2,11	2,71
663	0,45	0,75	1,06	1,36
980	0,31	0,51	0,71	0,92
1288	0,23	0,39	0,54	0,70
3428	0,09	0,15	0,20	0,26
5022	0,06	0,10	0,14	0,18
6847	0,04	0,07	0,10	0,13
8458	0,04	0,06	0,08	0,11

Enquanto este texto era preparado, estava sendo adquirido no Laboratório de Engenharia de Fluidos da PUC-Rio um sistema PIV de alta

freqüência, composto por câmera digital de alta taxa de amostragem e par de lasers pulsados de alta freqüência. Estima-se que, uma vez em utilização, este sistema seja capaz de medir campos de velocidade a uma taxa de amostragem de 1 kHz, o que possibilitará uma análise detalhada da evolução temporal das estruturas do escoamento presentes no espaço anular. Fica aqui como sugestão para a continuação do presente trabalho a utilização desta nova ferramenta de medição.

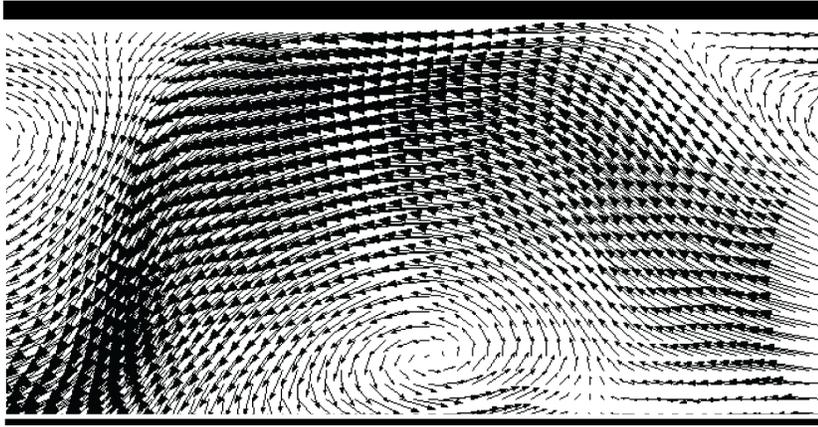
Duas referências básicas devem ser mencionadas quando se estudam os detalhes do escoamento axial em região anular com rotação do cilindro interno. Os trabalhos de Lueptow *et al.* (1992) e Wereley & Lueptow (1999) são estudos aprofundados dos padrões de escoamento em regiões anulares. Nestes trabalhos foram identificados uma variedade de possíveis padrões de escoamento que prevalecem para cada combinação  $Re_{axial}$  e  $Re_{rot}$ . A figura (1.2) apresentada na introdução deste trabalho foi retirada desta referência e indica os possíveis regimes de escoamento no plano  $Re_{axial} \times Re_{rot}$ . Onze regimes foram identificados, iniciando na combinação do escoamento de Couette, induzido pela rotação do cilindro interno, com o escoamento de Poiseulle produzido pelo gradiente axial de pressão. Para altos valores de  $Re_{rot}$ , vórtices turbulentos foram identificados. Os trabalhos mencionados, no entanto, analisaram uma pequena faixa de valores de número de Reynolds axial: de zero a 37. A razão para esta escolha decorre do fato que todas as transições de regime mencionadas ocorrem nesta faixa de número de Reynolds axial. No presente estudo, optou-se por investigar valores bem mais elevados de  $Re_{axial}$  devido à motivação inicial do trabalho estar voltada para aplicações de perfuração de poços de petróleo. De qualquer modo, as interessantes observações e justificativas encontradas nos trabalhos de Lueptow *et al.* (1992) e Wereley & Lueptow (1999) auxiliaram na interpretação dos resultados obtidos no presente trabalho.

### **Campos Instantâneos de Velocidade**

A figura (4.9) apresenta um campo de velocidade instantâneo medido com a técnica PIV para o caso onde  $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 900$ . Na figura, a fronteira superior representa o cilindro interno com rotação, enquanto a fronteira inferior representa o cilindro externo estacionário. A direção do escoamento axial na figura (4.9) se dá da direita para a esquerda.

Uma observação da figura mostra claramente a natureza ondulada do escoamento axial, contornando regiões de vórtices que não ocupam totalmente a seção anular. Estes vórtices estão localizados alternadamente

## Cilindro Interno



## Cilindro Externo

Figura 4.9: Campo de velocidade instantâneo para escoamento axial com rotação do cilindro interno, para  $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 900$ . Escoamento axial da direita para a esquerda.

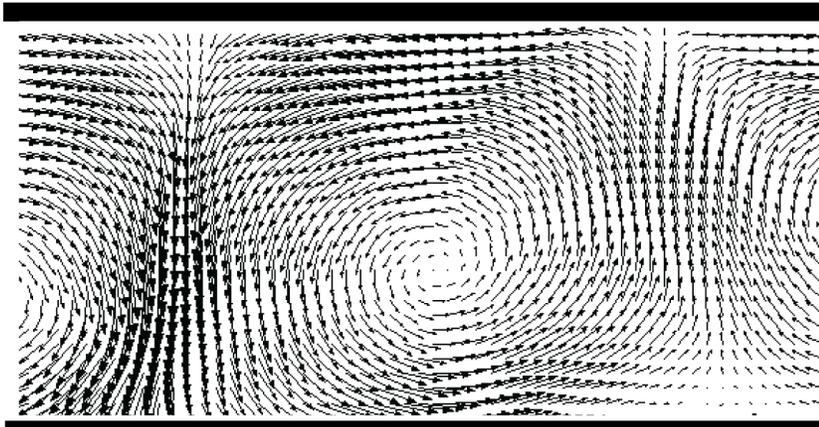
junto às paredes interna e externa da região anular. Devido à limitação do campo de visão da câmera que registrou a imagem do escoamento, apenas metade de cada vórtice junto ao cilindro interno pode ser visualizada

Uma melhor visualização do escoamento pode ser obtida se mudarmos o referencial de observação do laboratório, caso da figura (4.9), para um referencial que se move com os vórtices. Como a velocidade de translação dos vórtices é aproximadamente igual à velocidade axial imposta ao escoamento, pode-se subtrair do campo instantâneo da figura (4.9) o valor da velocidade axial média espacial deste mesmo campo. Este procedimento, no entanto, produz distorções nos vórtices próximos às paredes.

Outra opção, que não introduz a distorção mencionada no parágrafo anterior, é a subtração do campo de velocidade axial médio no tempo. O resultado desta operação é apresentado na figura (4.10). Pode ser observado na figura (4.10) que a remoção do campo de velocidade axial médio no tempo resulta em um escoamento com vórtices bem definidos que ocupam todo o espaço anular. Nota-se também, que não há praticamente transferência de fluido de um vórtice para outro, e que o escoamento direcionado do cilindro interno para o cilindro externo é bem mais intenso do que aquele na direção contrária.

Antes de apresentar os resultados dos campos de velocidade instantâneos obtidos pela técnica de PIV será apresentado um mapa com os padrões de escoamentos identificados neste trabalho. Estes padrões foram revelados quando o campo de velocidade axial médio temporal foi subtraído

## Cilindro Interno



## Cilindro Externo

Figura 4.10: Campo de Velocidade instantâneo subtraído do perfil de velocidade axial, para  $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 900$ .

dos campos de velocidade instantâneos. Este mapa visa a uma melhor interpretação e apresentação dos resultados dos campos de velocidade instantâneos. Uma informação relevante deve ser apontada. Até o momento da preparação do texto deste trabalho, os resultados apresentados por este trabalho a partir deste ponto não foram encontrados na literatura, sendo, até este momento, o primeiro trabalho a apresentar os campos de velocidade instantâneos para valores de número de Reynolds axial que abrangem desde regimes de escoamento laminares, transição laminar-turbulento e regimes turbulento. Portanto, esta é uma primeira abordagem dos resultados dos campos de velocidade instantâneos e dos padrões identificados no presente trabalho, sendo alvo de trabalhos futuros para a confirmação dos padrões aqui apresentados.

Basicamente, foram identificados quatro padrões de escoamento.

- **Escoamento com Vórtices (EV)**: Caracterizado pela presença de pares de vórtices, semelhantes aos vórtices presentes em escoamento de Taylor-Couette, com a diferença que estes vórtices transladam aproximadamente com a velocidade média do escoamento. Este padrão de escoamento foi encontrado para razões entre Reynolds rotacional e Reynolds axial maiores ou igual a 2,22;
- **Escoamento com vórtices aleatórios (EVA)**: Caracterizado pela aleatoriedade dos vórtices em tamanho e posição no escoamento. Esse caso foi encontrado para razões de Reynolds entre 0,70 a 2,11.

- **Escoamento Turbulento (ET):** Caracterizado pela pouca ou nenhuma influência do efeito da rotação do cilindro interno no escoamento, e também pelo fato de ocorrerem para números de Reynolds axial turbulento.
- **Escoamento sem presença de vórtices (ESV):** Para este padrão, a rotação do cilindro interno não provoca o aparecimento de vórtices, devido a imposição do escoamento axial ser mais pronunciada. Ocorre para razões de Reynolds entre 0,54 e 0,23, no regime de escoamento laminar.

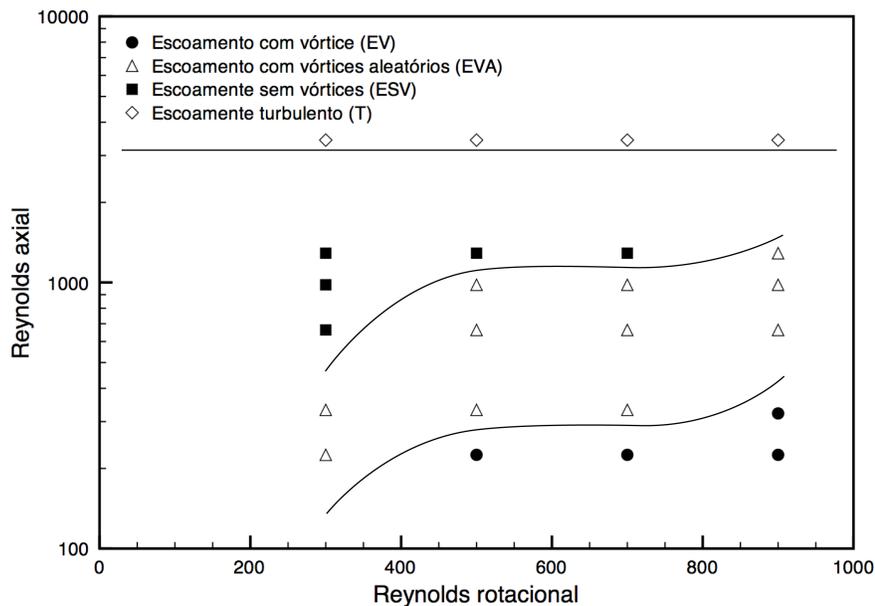


Figura 4.11: Mapa diferenciando os padrões de escoamento identificados por este trabalho.

As figuras (4.12) a (4.20) mostram uma sequência de campos instantâneos de velocidade. Os campos da esquerda das figuras são os campos de velocidade medidos em relação ao referencial do laboratório enquanto os campos de velocidade da direita são os mesmos campos de velocidade subtraído, porém do campo de velocidade axial médio no tempo.

Para os casos onde foram identificados pares de vórtices (EV), ao lado de cada campo é apresentado o tempo entre cada quadro,  $\Delta t$ . Para fins de comparação, na legenda destas figuras é indicada a distância percorrida por uma partícula de fluido à velocidade média do escoamento,  $d_v$ , entre cada quadro de cada caso. O tempo entre cada quadro é função da rotação do cilindro interno, já que a aquisição de cada campo de velocidade foi realizada para cada revolução completa do eixo. Quando a distância percorrida,  $d_v$ , é

superior ao comprimento do campo de velocidade medido e apresentado nas figuras, conclui-se que os vórtices observados em cada instante de tempo não representam uma seqüência de imagens de uma mesma estrutura, pois o tempo entre cada quadro,  $\Delta t$ , nestes casos, é suficiente para que um dado vórtice se movimente para fora do campo de visão da câmera.

Já quando  $d_v$  é menor que o comprimento do campo de velocidade, as seqüências de imagens mostram as diferentes posições de um mesmo vórtice em cada instante de tempo. Esta situação ocorre somente para a combinação do maior valor de  $Re_{rot}$  e o menor valor de  $Re_{axial}$  investigados, e apresentado na figura (4.15). Neste caso, para facilitar a análise da evolução o centro do mesmo vórtice em diferentes instantes de tempo foi assinalado com um símbolo nesta figura.

#### – Escoamento com vórtices Aleatórios (EVA)

A seguir são apresentados os casos onde ocorrem o padrão de escoamento classificado por este trabalho como Escoamento com Vórtices Aleatórios.

O padrão de escoamento com vórtices aleatório (EVA) ocorre para os casos das figuras (4.12), (4.16), (4.17) e (4.18), como pode ser visto na seqüência de campos da direita da figura. Note que os vórtices têm tamanhos aleatórios e surgem em várias posições do escoamento. As figuras (C.1), (C.2), (C.3), (C.5), (C.6), (C.7) e (C.11) que estão no Apêndice C, também apresentam o mesmo comportamento, indicando a presença do mesmo padrão aleatório.

#### – Escoamento com Vórtices (EV)

O padrão de escoamento com vórtices (EV) ocorre para os casos das figuras (4.13), (4.14), (4.15) e (4.19).

Apesar de existirem variações nos padrões de escoamento com vórtices, como foi constatado por Lueptow *et al.* (1992) e Wereley & Lueptow (1999), o presente trabalho não possui os dados necessários para fazer a identificação destes sub-padrões de vórtices. Lueptow *et al.* (1992) fizeram esta identificação pela da visualização do escoamento. Wereley & Lueptow (1999) fizeram a identificação dos padrões através da análise espectral de 2500 campos de velocidade. No presente trabalho, devido a limitações no tempo de processamento e armazenagem do dados, foram obtidos apenas 150 campos de velocidade para cada caso investigado, valor insuficiente para a realização de uma análise espectral como a realizada na referência mencionada.

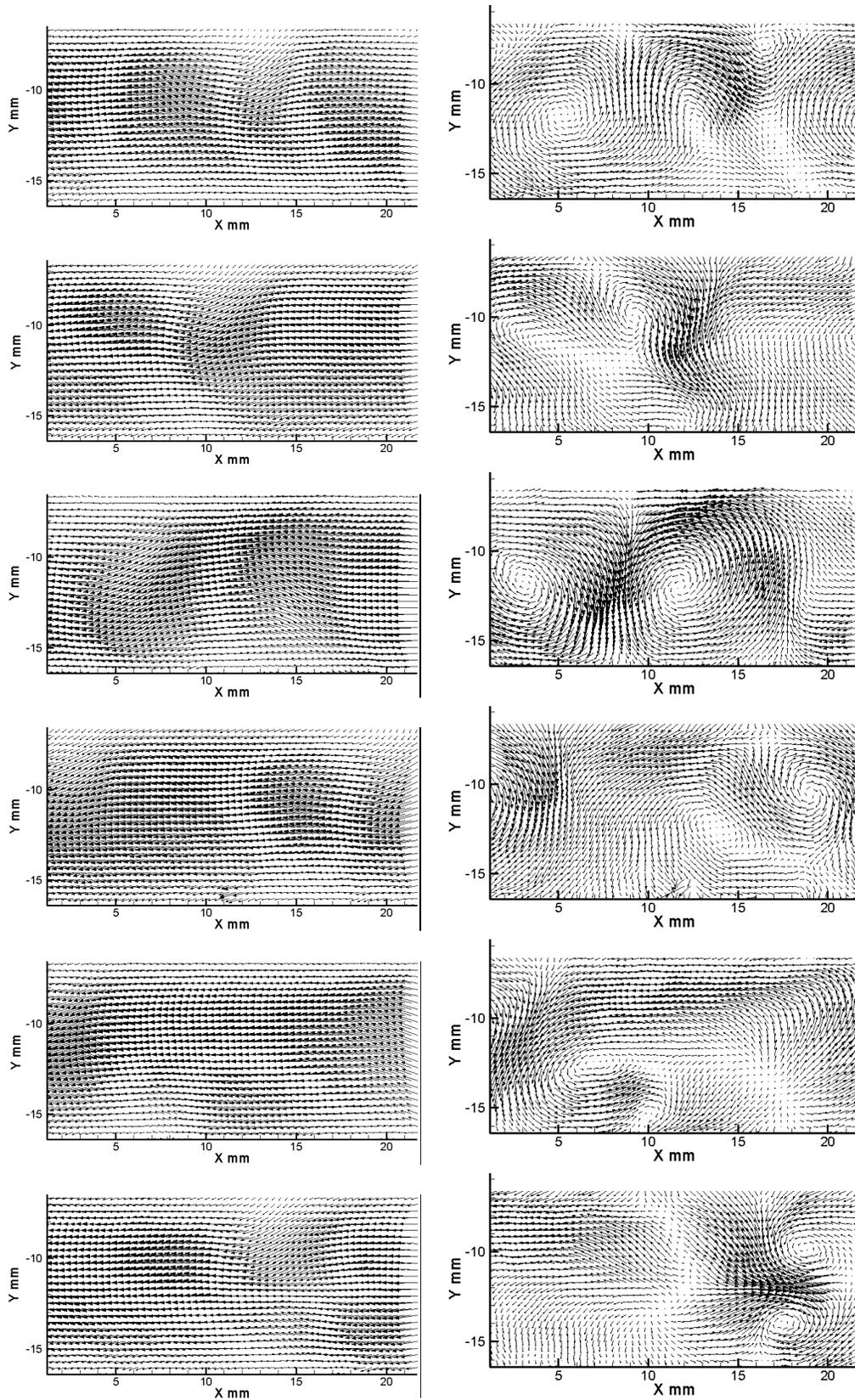


Figura 4.12: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=1,33$  ( $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 300$ ) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).

Porém, são apresentadas algumas diferenças entre os vórtices para os casos que apresentam este tipo de padrão.

Para o caso onde  $RR=2,22$  ( $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 500$ ), figura (4.13), pode-se notar que há uma transferência de fluido entre vórtices adjacentes, tanto para vórtices a jusante quanto para vórtices a montante. Outras duas características deste caso são a presença de vórtices alongados, como pode ser visto no sexto quadro da figura (4.13), e do fato que os centros deste vórtices não são estáveis, aparecendo em diferentes posições na direção radial. À medida que a rotação do cilindro interno aumenta, casos  $RR=3,11$  da figura(4.14), e  $RR=4,00$  da figura (4.15), os vórtices ficam mais intensos e mais estáveis, e a transferência de fluido entre vórtices diminui, ficando mais semelhantes aos vórtices de Taylor, principalmente na figura 4.15.

Uma particularidade do caso  $RR=3,33$ , figura (4.14) pode ser apontada. Apesar de parecer que o vórtice da direita da imagem do primeiro quadro translada nos quadros subsequentes, estes, na verdade, não são os mesmos vórtices. Como a velocidade de translação dos vórtices é aproximadamente a velocidade média do escoamento, para este caso os vórtices transladam de 25mm entre cada quadro da figura. Como o campo de visão é de 22mm na direção axial, aparentemente tem-se a impressão que os vórtices transladam de 3mm entre cada quadro na direção axial. Vale resaltar que, devido a este fato, o escoamento neste caso de  $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 700$  é bem coerente e as estruturas de vórtices não parecem alterar muito ao longo do tempo.

O caso da figura (4.15) já apresenta a evolução espacial dos vórtices. Isso pode ser constatado comparando o tempo entre cada quadro,  $\Delta t$ , e a distância percorrida por uma partícula à velocidade média do escoamento,  $d_v$ . O centro de cada vórtice que translada entre os quadros foram identificados com marcações distintas. Os vórtices identificados transladam de 15 mm entre cada quadro.

A figura (4.19) também apresenta este padrão de escoamento com vórtices (EV). Para este caso, os vórtices que giram no sentido horário na figura apresentam menor tamanho quando comparados com os vórtices adjacentes. A provável causa para este fato é devido à maior intensidade do escoamento axial que impõe uma transferência de fluido entre vórtice predominantemente na direção do escoamento axial.

#### – Escoamento Sem a presença de Vórtices (ESV)

O caso da figura (4.20) apresenta o padrão de escoamento sem vórtices (EVS). Quando o campo de velocidade axial médio no tempo é subtraído,

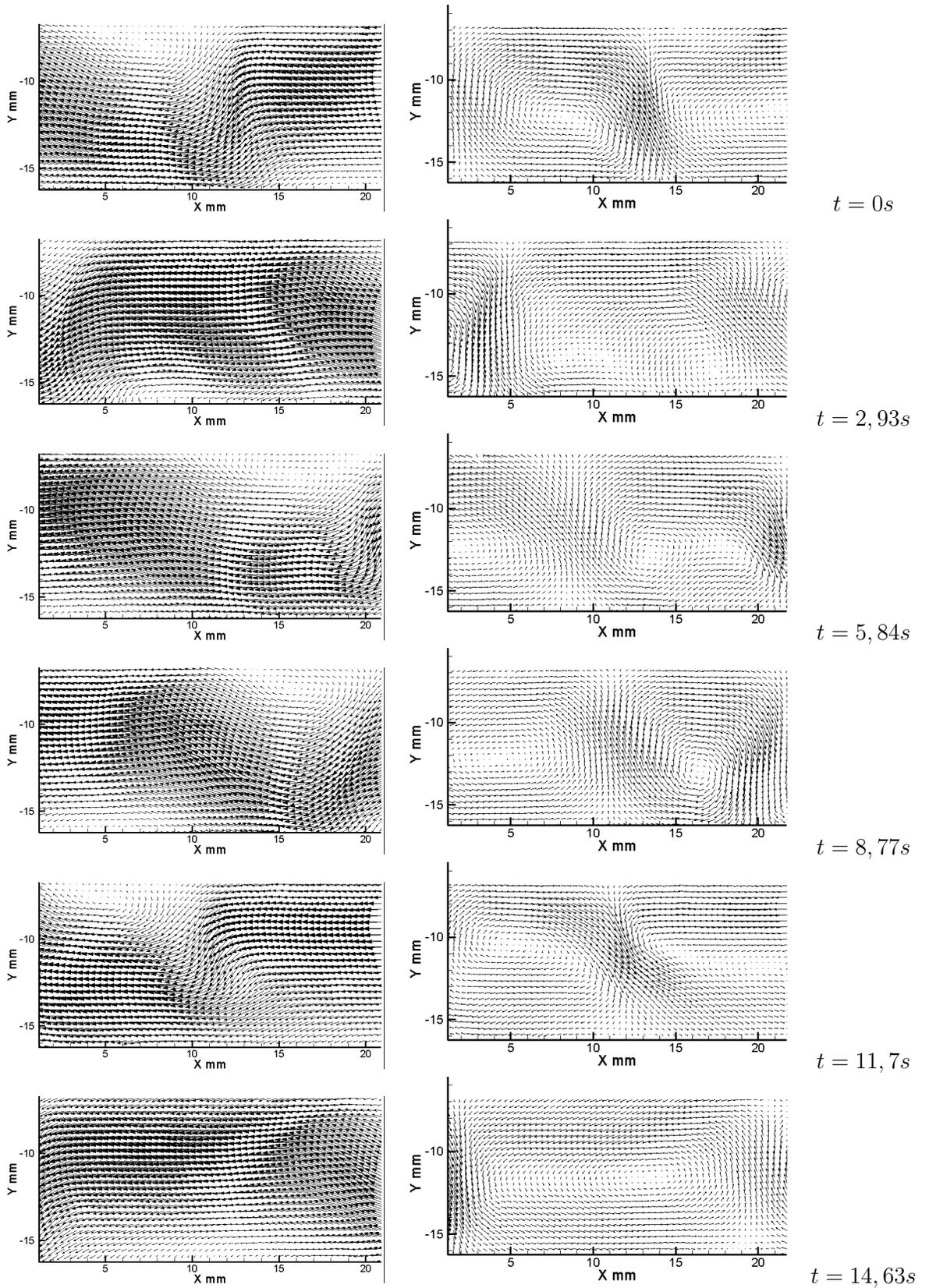


Figura 4.13: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=2,22$  ( $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 500$ ) (Escoamento com vórtices-EV),  $d_v = 29,3mm$ .

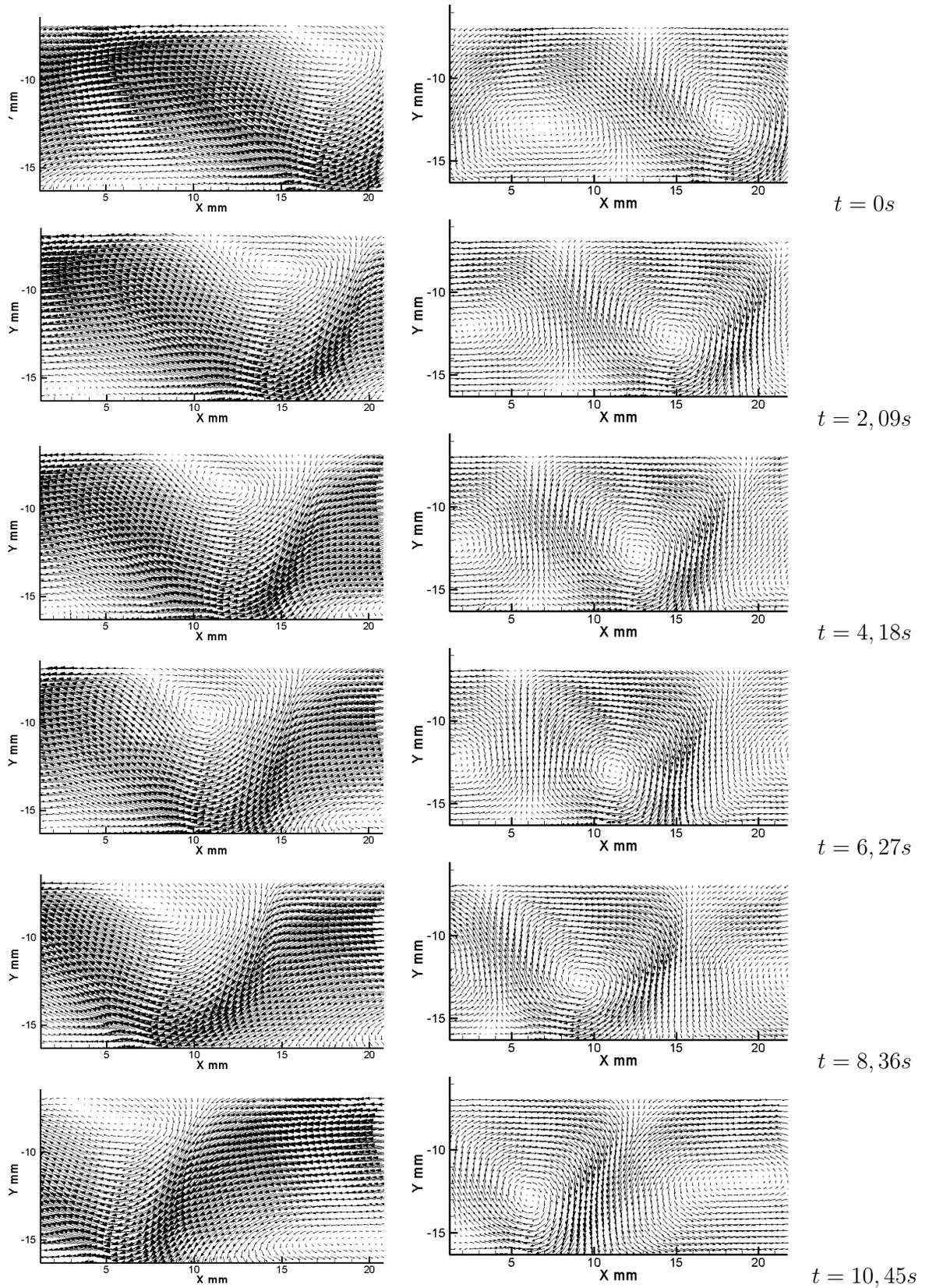


Figura 4.14: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=3,11$  ( $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 700$ ) (Escoamento com vórtices-EV),  $d_v = 25mm$ .

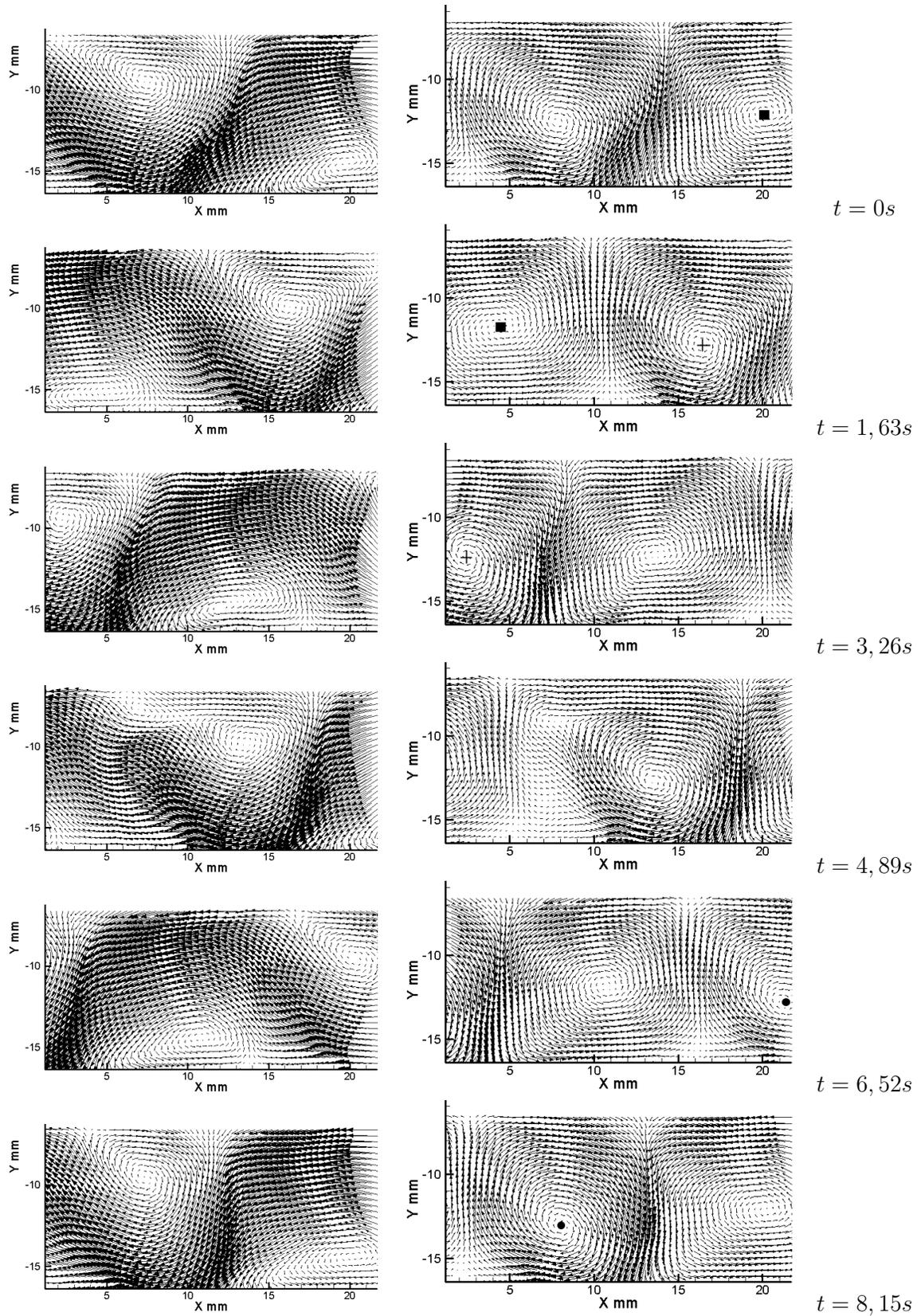


Figura 4.15: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=4,00$  ( $Re_{axial} = 225$  e  $Re_{rot} = 900$ ) (Escoamento com vórtices-EV),  $d_v = 15mm$ .

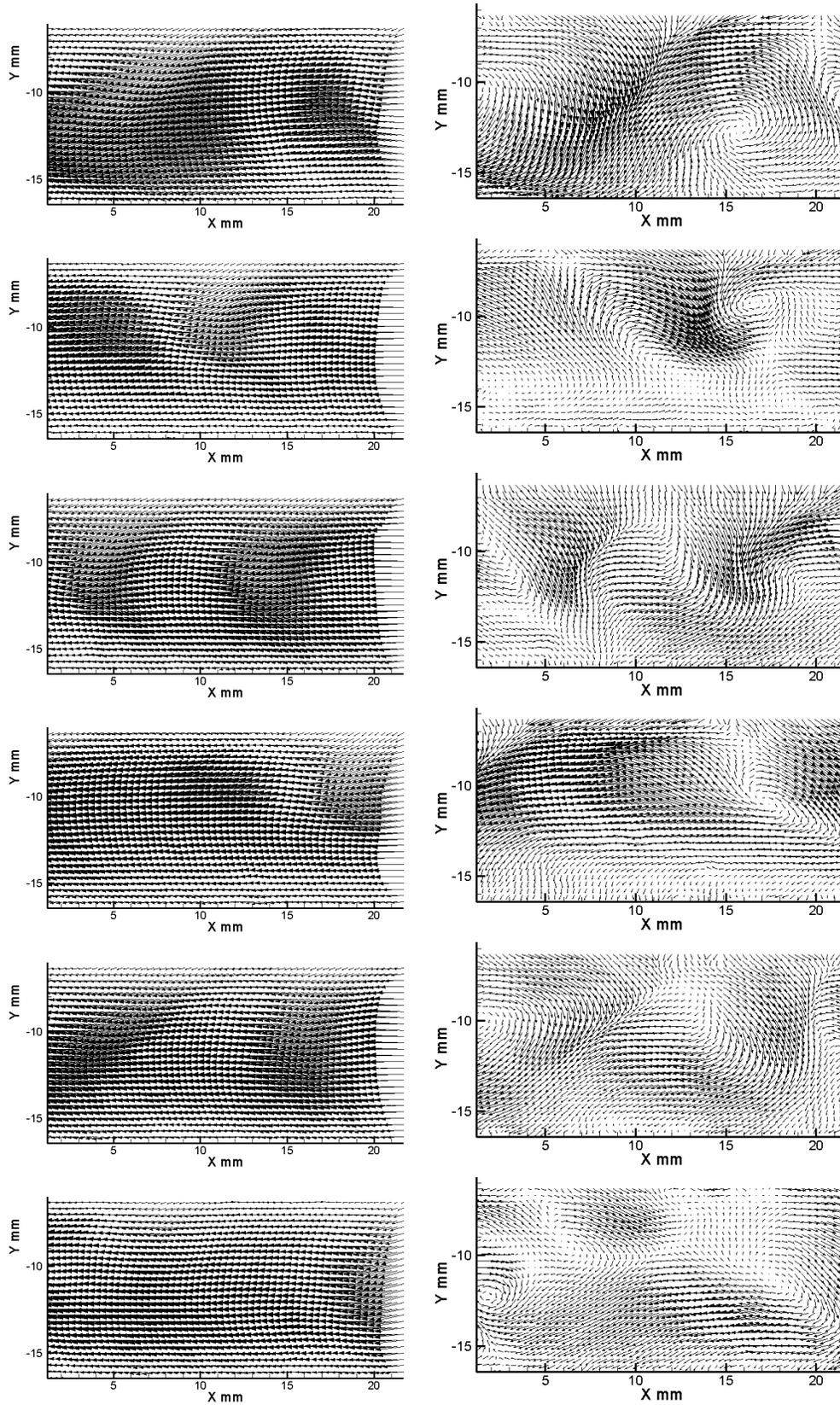


Figura 4.16: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,9$  ( $Re_{axial} = 332$  e  $Re_{rot} = 300$ ) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).

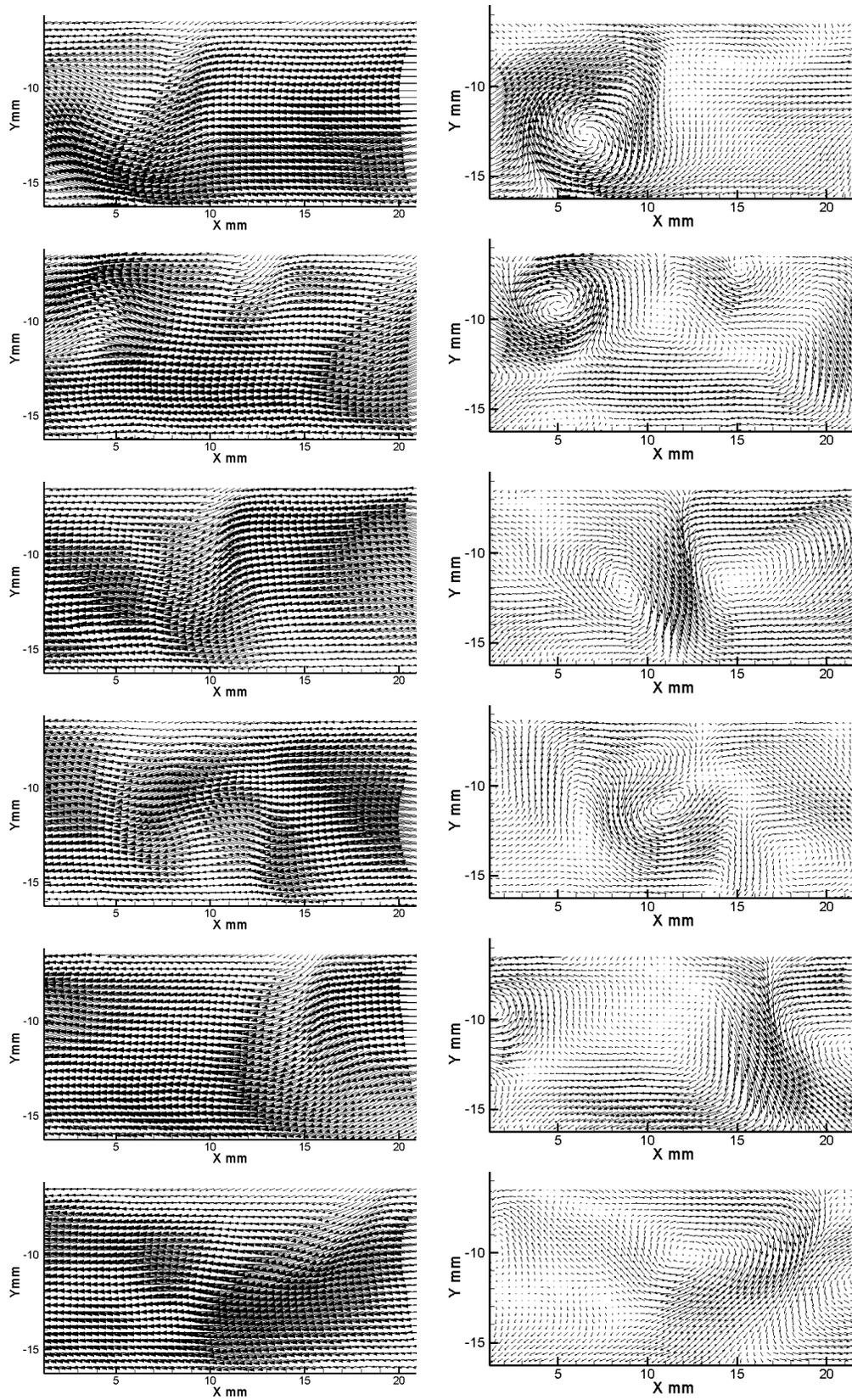


Figura 4.17: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=1,51$  ( $Re_{axial} = 332$  e  $Re_{rot} = 500$ ) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).

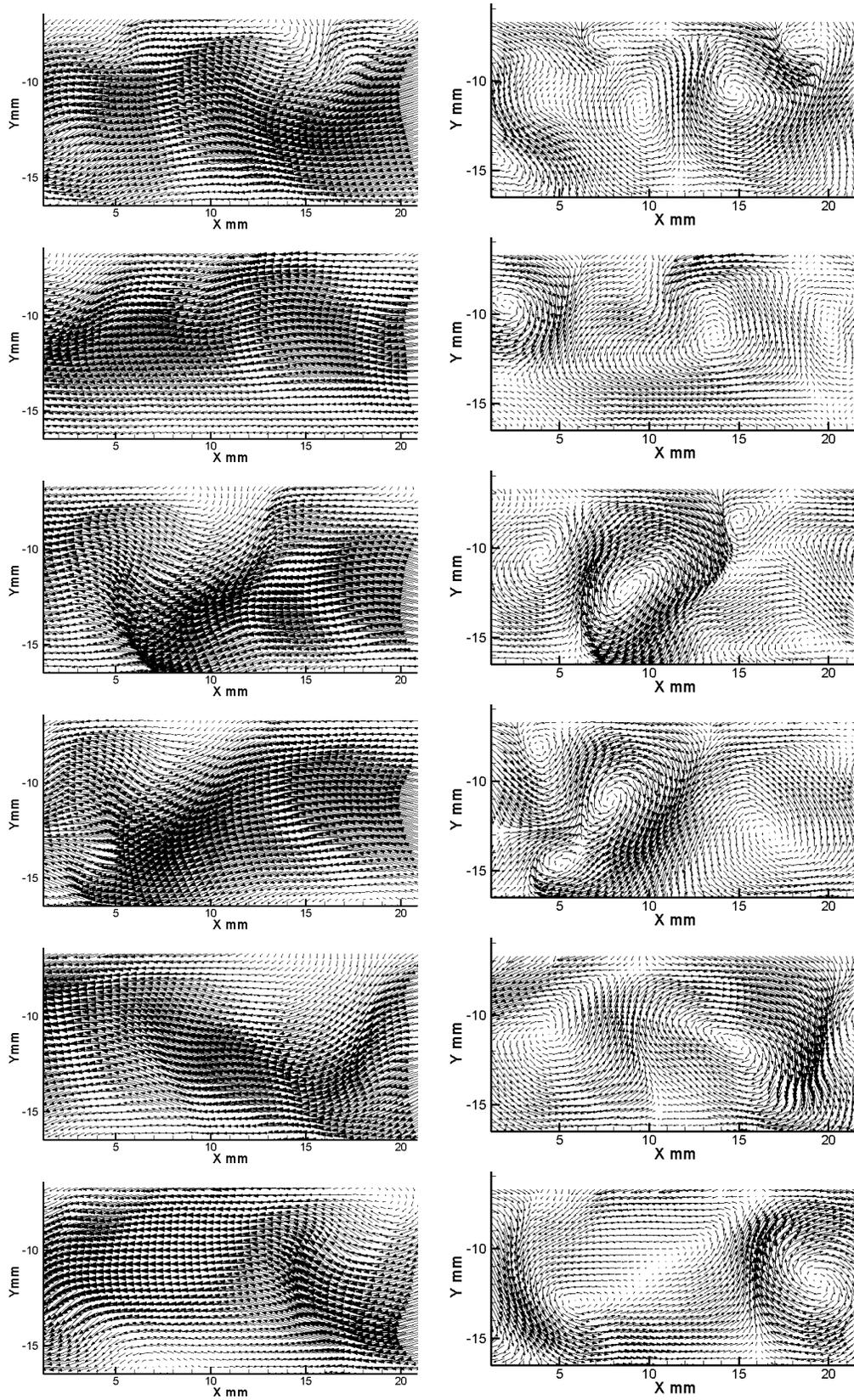


Figura 4.18: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=2,11$  ( $Re_{axial} = 332$  e  $Re_{rot} = 700$ ) (Escoamento com vórtices aleatórios-EVA).

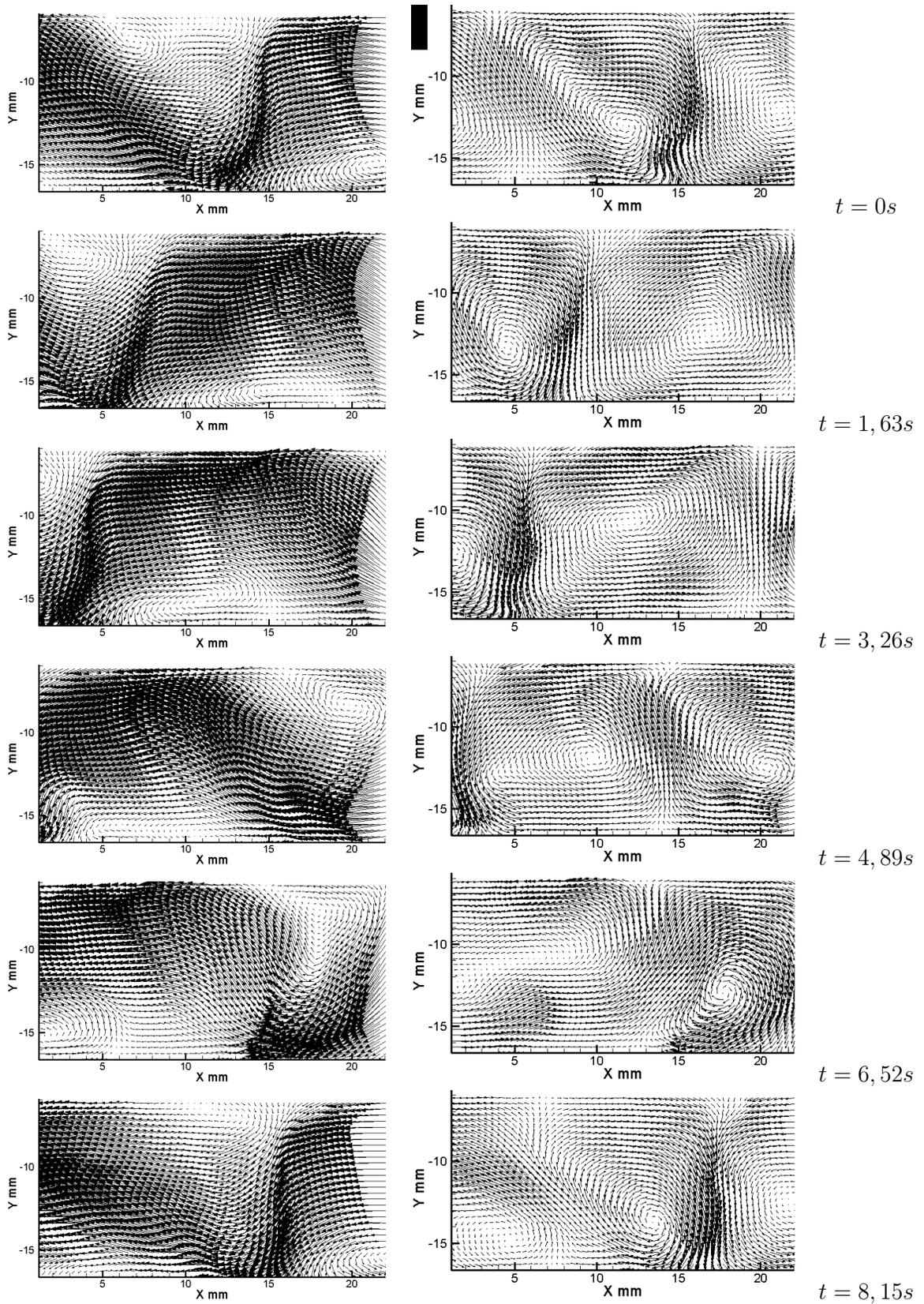


Figura 4.19: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=2,71$  ( $Re_{axial} = 332$  e  $Re_{rot} = 900$ ) (Escoamento com vórtices-EV),  $d_v = 28,5mm$ .

não é possível identificar qualquer estrutura estável no escoamento. As figuras (C.4), (C.8), (C.9) e (C.10) que apresentam este mesmo padrão de escoamento estão presentes no Apêndice C.

#### – Escoamento Turbulento (ET)

As figuras (4.21), (4.22), (4.23) e (4.24) apresentam os 4 casos para os valores de números de Reynolds axial turbulento e duas rotações do cilindro interno,  $Re_{rot} = 300$  e  $Re_{rot} = 900$ . A turbulência é caracterizada por flutuações de velocidade ao redor de um valor médio, e também pela presença de escalas. A energia destas escalas vão sendo transferidas de escalas maiores para escalas menores, chamado de cascata de energia proposto por Kolmogorov (1941). Quando o campo de velocidade axial médio temporal é subtraído dos campos de velocidades instantâneos, o resultado são as flutuações de velocidade nas direções radial e axial do escoamento. Se forem comparados os campos de velocidade instantâneos subtraídos das figuras (4.21), (4.22), (4.23) e (4.24), a maior diferença entre estes casos parece estar para  $Re_{rot} = 900$  da figura (4.21), que corresponde ao menor valores de número de Reynolds turbulento e para a maior rotação investigados.

#### Perfis de Velocidade Axial Médios

O comportamento do escoamento no interior da região anular revelado pelos campos instantâneos de velocidade apresentados pode ser também explorados através do estudo de perfis de velocidade axial. Os perfis de velocidade a serem apresentados foram obtidos a partir da média temporal de 150 campos instantâneos de velocidade. Destes campos médios de velocidade foram extraídos perfis radiais de velocidade axial. Deve-se mencionar que perfis de velocidade axial médio temporal extraídos em posições axiais diferentes dentro dos campos medidos mostraram-se coincidentes.

A apresentação dos perfis de velocidades axiais médios são feitas nas figuras (4.25) a (4.33), onde a velocidade axial adimensionalizada pela velocidade média na seção,  $u_z/U$ , é apresentada em função da coordenada radial adimensional,  $y/\delta$ . Nesta adimensionalização,  $y/\delta = 0$ , corresponde à parede externa fixa e  $y/\delta = 2$  corresponde à parede interna do cilindro girante. Em cada figura, são apresentados os perfis de velocidade para três valores de número de Reynolds rotacionais, zero, 300 e 900.

Na figura (4.25), para  $Re_{axial} = 225$ , nota-se que o perfil parabólico característico do escoamento sem rotação sofre progressivo achatamento

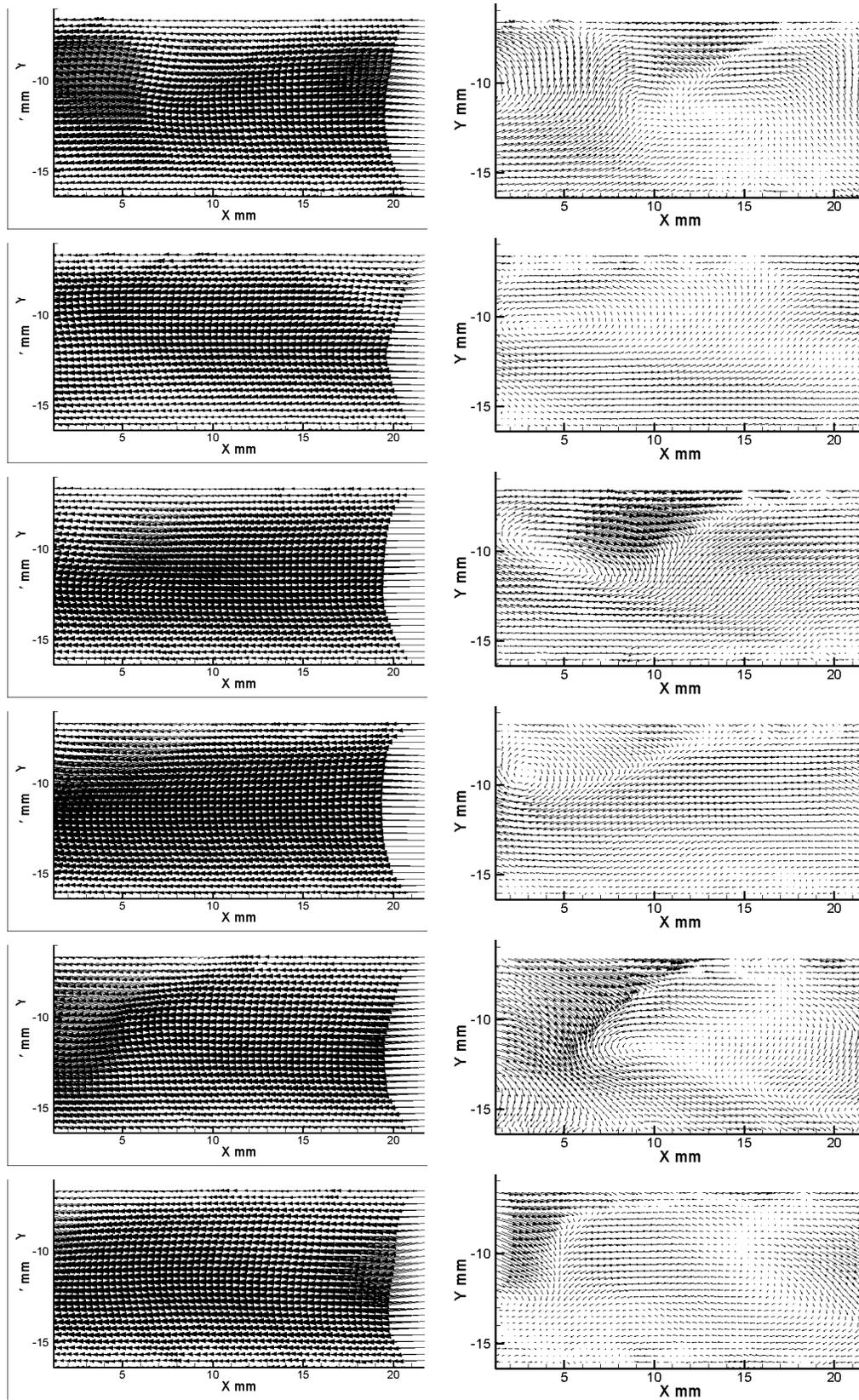


Figura 4.20: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,45$  ( $Re_{axial} = 663$  e  $Re_{rot} = 300$ ) (Escoamento sem a presença de vortices-ESV).

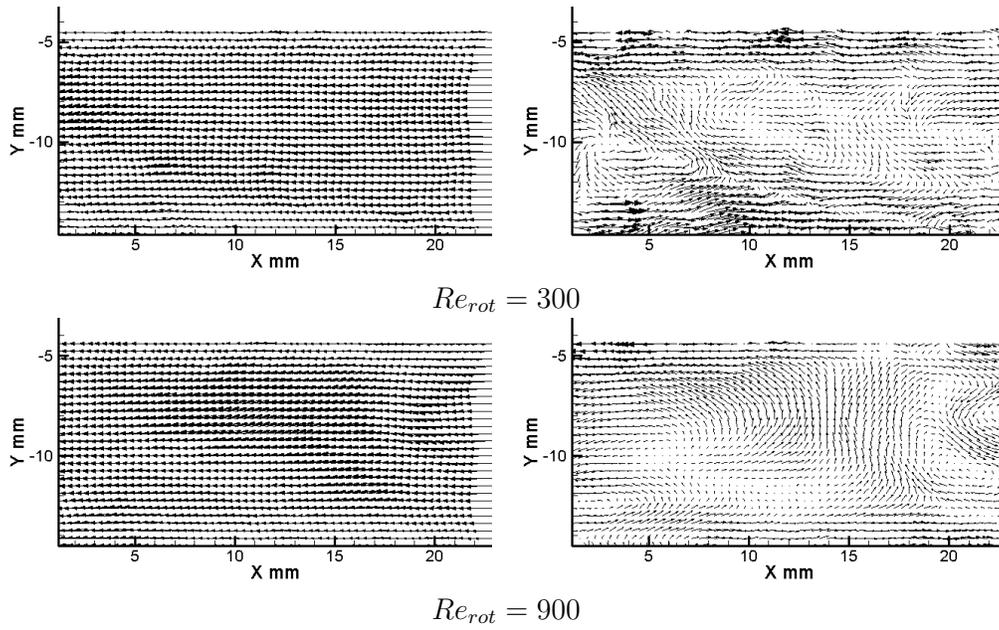


Figura 4.21: Comparação entre os campos de velocidade para  $Re_{axial} = 3428$  (Escoamento turbulento-ET).

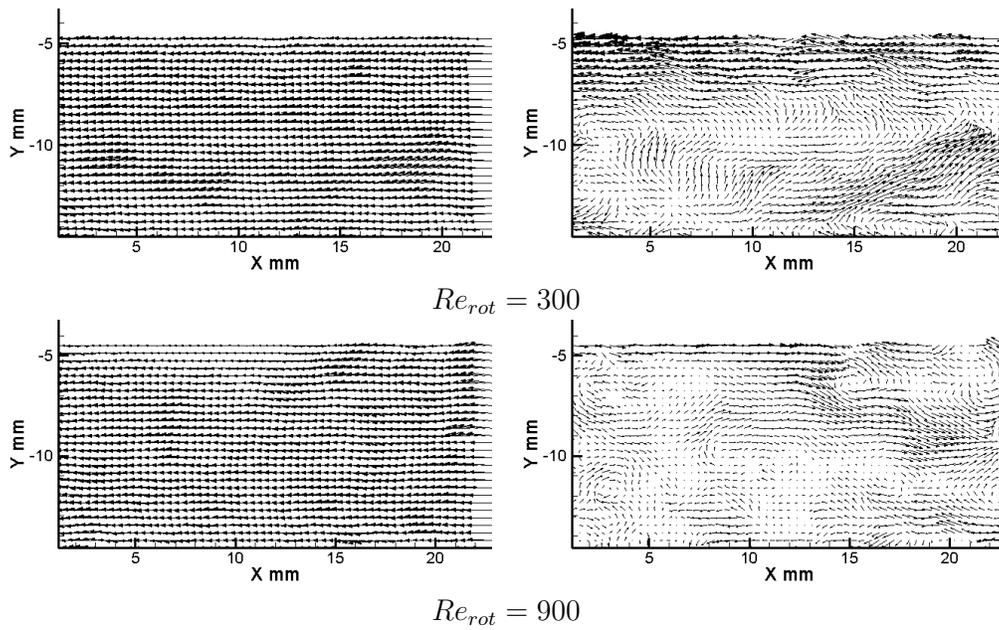


Figura 4.22: Comparação entre os campos de velocidade para  $Re_{axial} = 5022$  (Escoamento turbulento-ET).

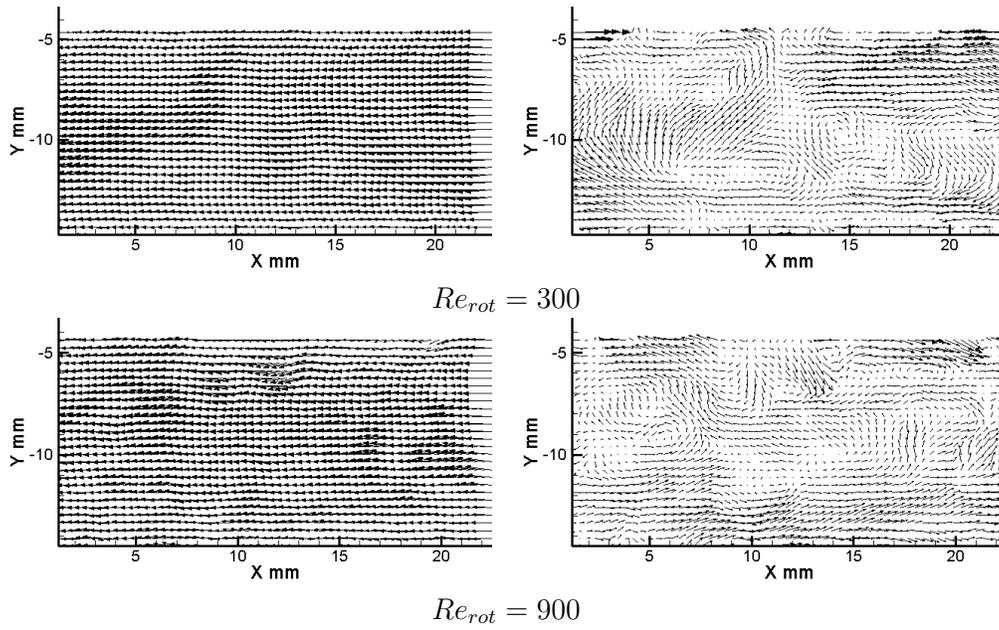


Figura 4.23: Comparação entre os campos de velocidade para  $Re_{axial} = 6847$  (Escoamento turbulento-ET).

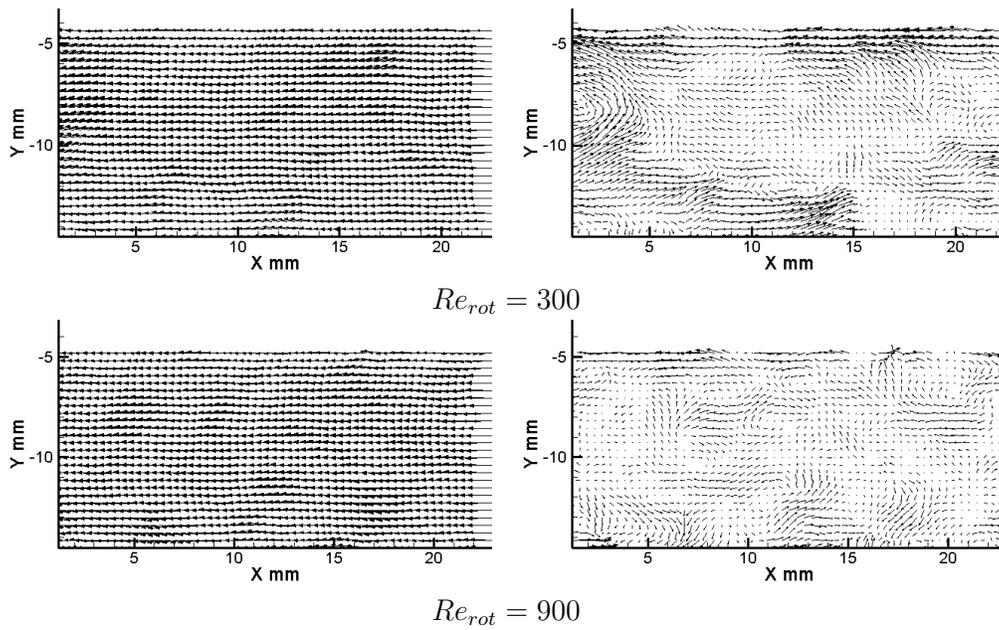


Figura 4.24: Comparação entre os campos de velocidade para  $Re_{axial} = 8458$  (Escoamento turbulento-ET).

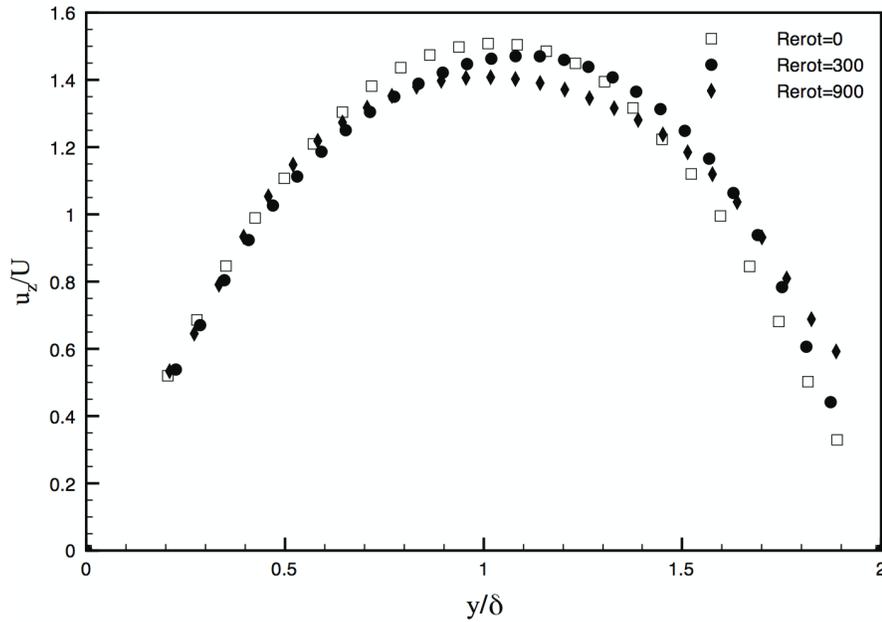


Figura 4.25: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 225$ .

e distorção à medida que a rotação do cilindro interno é aumentada. Esta mudança no formato do perfil pode ser atribuída à transferência de quantidade de movimento axial promovida pela presença do movimento secundário provocado pela rotação do cilindro interno.

À medida que o valor do número de Reynolds rotacional aumenta, o perfil de velocidade vai se tornando mais achatado, perdendo a forma parabólica, em função da rotação do cilindro interno. Uma comparação dos perfis de velocidade apresentados nas figuras (4.26) e (4.27) indica que o maior valor do número de Reynolds axial torna o perfil mais resistente à deformação, exigindo um maior valor de número de Reynolds rotacional para que o achatamento do perfil torne-se mais pronunciado. Esta observação é ainda mais evidente nas figuras (4.28) e (4.29), onde o número de Reynolds axial apresenta maiores valores, porém ainda no regime Laminar.

A partir da figura (4.30) até a figura (4.33), a forma dos perfis de velocidade é fortemente alterada devido à presença do regime de escoamento turbulento. Não só a forma dos perfis de velocidade torna-se mais achatada como esperado para este regime de escoamento, como também o efeito da rotação do cilindro interno torna-se significativamente mais fraco. De fato, pode-se observar na figura (4.30) correspondente ao número de Reynolds axial turbulento igual a 3428 uma pequena diferença entre os perfis de velocidade medidos para os três valores de  $Re_{rot}$ , diferença esta que vai progressivamente desaparecendo à medida que o número de Reynolds cresce

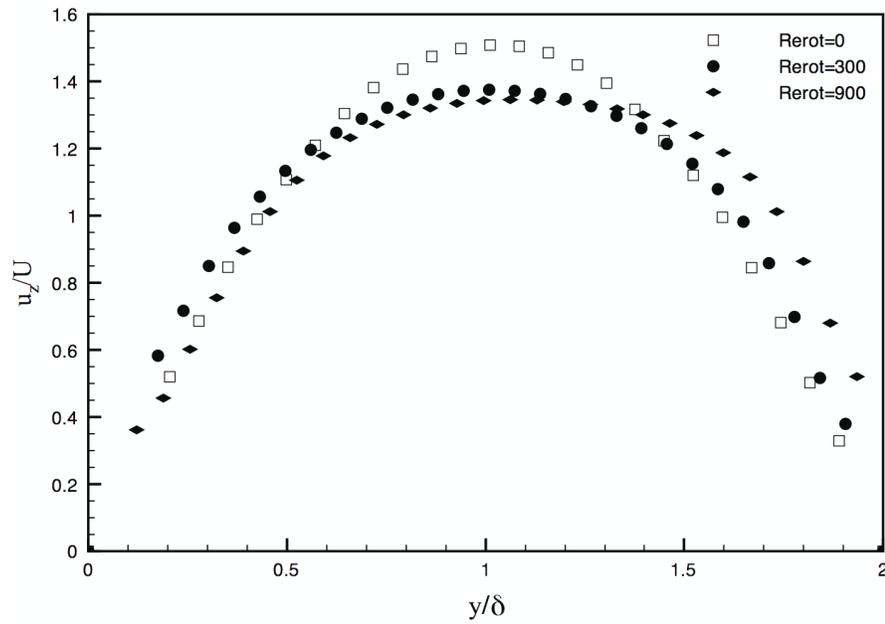


Figura 4.26: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 332$ .

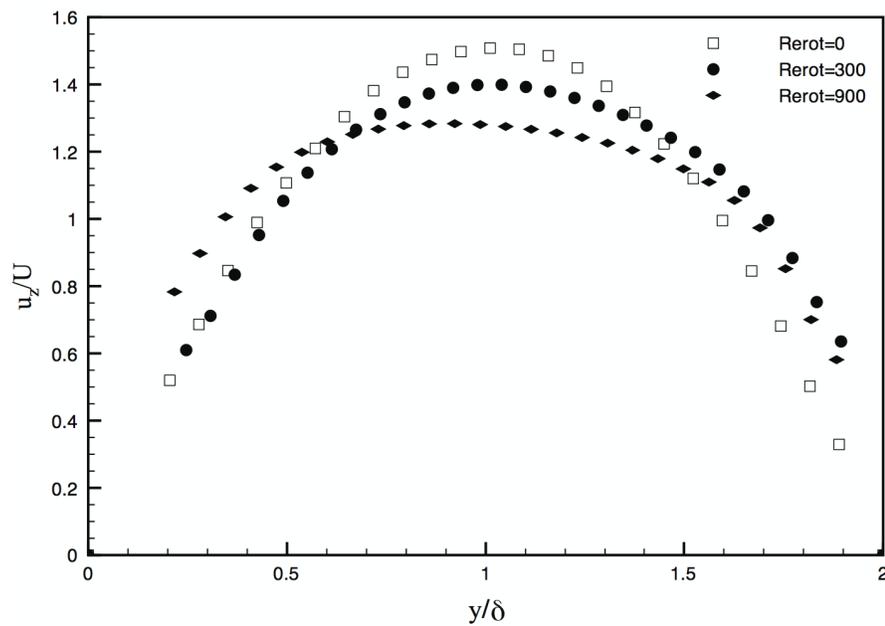


Figura 4.27: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 622$ .

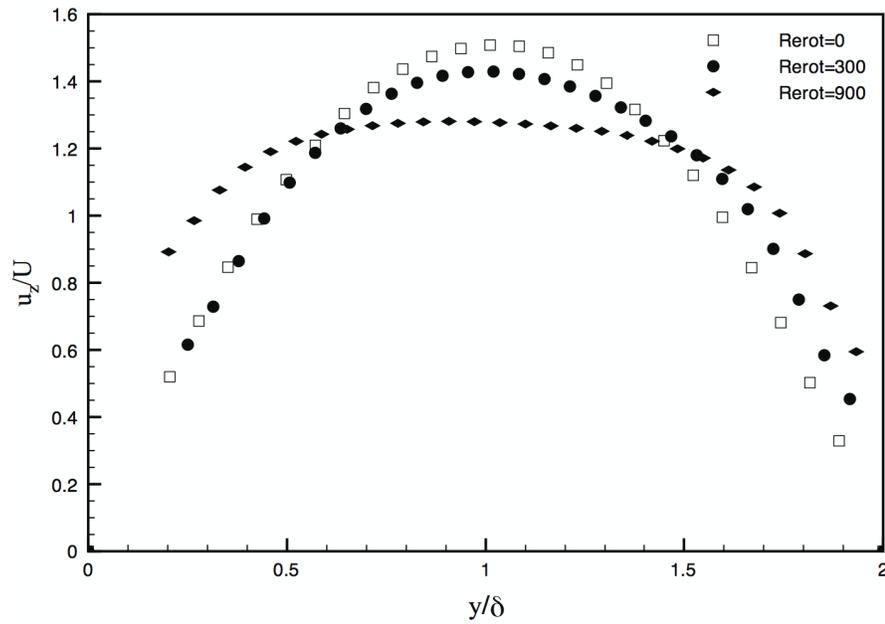


Figura 4.28: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 979$ .

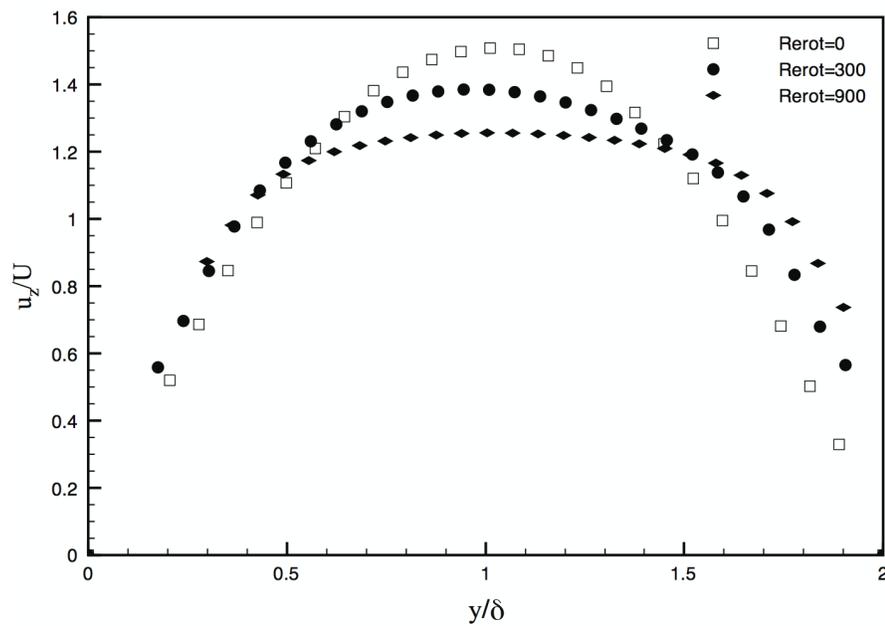


Figura 4.29: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 1287$ .

até atingir o valor máximo investigado de 8456, apresentado na figura (4.33), onde os perfis de velocidades podem ser considerados coincidentes.

Esta insensibilidade à rotação dos perfis de velocidade para valores de números de Reynolds axial elevados é explicada pelo intenso transporte lateral de quantidade de movimento característico do escoamento turbulento que se sobrepõem aos efeitos de mistura oriundos da rotação do cilindro interno.

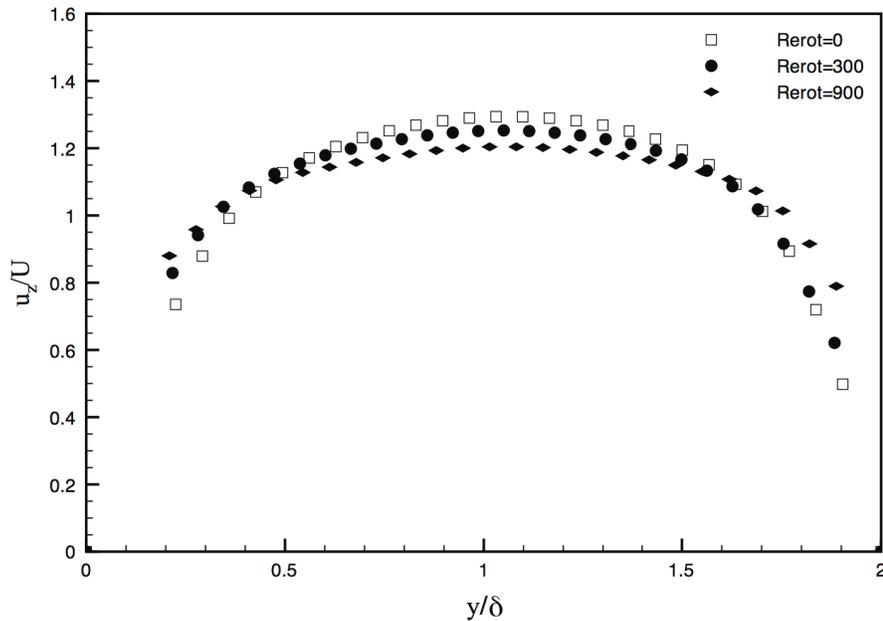


Figura 4.30: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 3428$ .

Os perfis de velocidade axial apresentados auxiliam também na compreensão dos efeitos da rotação do cilindro interno sobre o fator de atrito hidrodinâmico apresentados na seção 4.2.1. Com o auxílio das figuras (4.6) e (4.7) mostrou-se que o efeito da rotação sobre o fator de atrito hidrodinâmico é significativo para baixos valores de número de Reynolds axial, tornando-se máximo para valores próximos da transição laminar-turbulento, e decaindo à medida que o valor do número de Reynolds axial cresce.

O comportamento descrito do fator de atrito pode ser relacionado ao comportamento dos perfis de velocidades axial apresentados. Para isso é necessário lembrar que o fator de atrito representa o gradiente de pressão adimensionalizado. O gradiente de pressão pode ser obtido por um balanço de forças em um elemento de fluido anular limitados pelas paredes dos

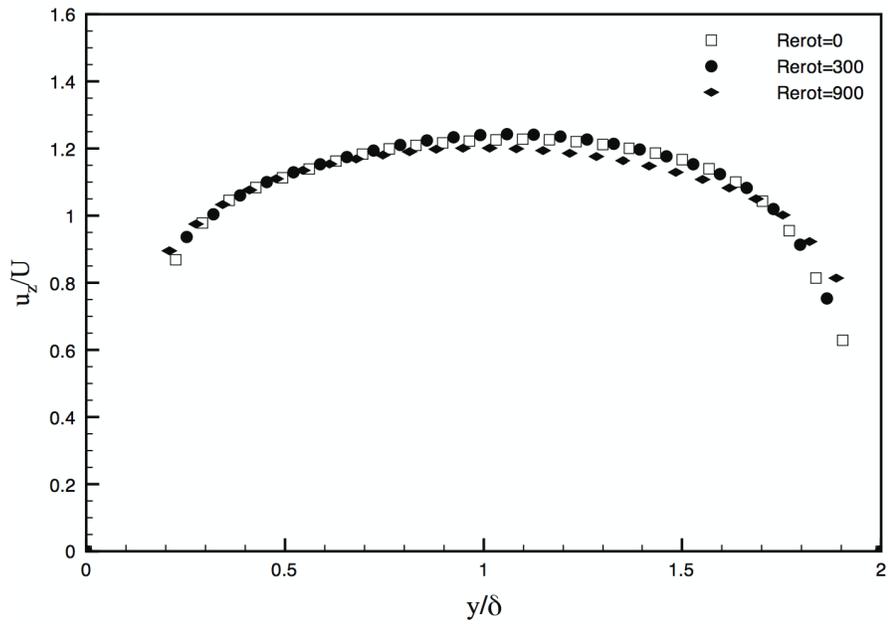


Figura 4.31: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 5021$ .

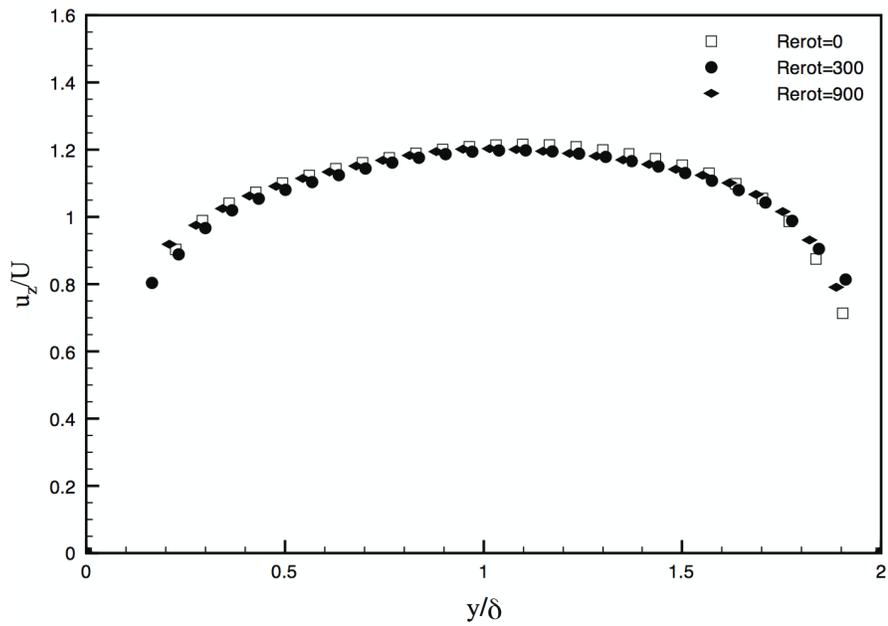


Figura 4.32: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 6847$ .

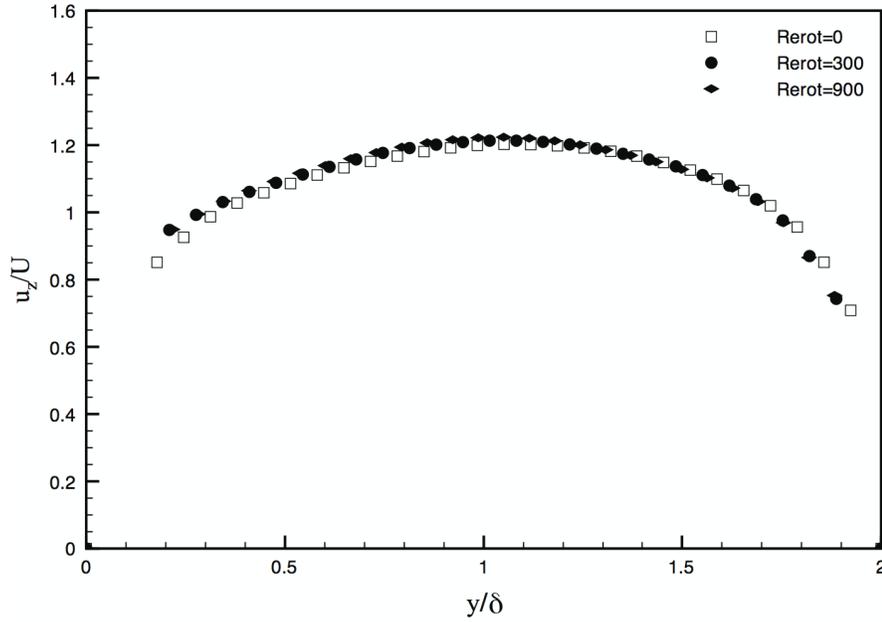


Figura 4.33: Comparação dos perfis de velocidade axial médio para três rotações do cilindro interno e  $Re_{axial} = 8456$ .

cilindros interno e externo. Este balanço é apresentado na equação (4-6).

$$\frac{\Delta P}{L} = 2 \frac{\tau_e r_e - \tau_i r_i}{r_e^2 - r_i^2} \quad (4-6)$$

onde,  $\tau_e$  e  $\tau_i$  são, respectivamente, as tensões tangenciais agindo nas paredes externa e interna da região anular. Em coordenadas cilíndricas as tensões tangenciais agindo nas paredes interna e externa na direção axial são dadas pela equação 4-7

$$\tau_{rz} = \mu \left( \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \quad (4-7)$$

onde  $\tau_{rz}$  é a tensão tangencial,  $\mu$  a viscosidade do fluido,  $u_r$  a velocidade radial e  $u_z$  a velocidade axial. Junto às paredes o termo  $\frac{\partial u_r}{\partial z}$  é nulo e a tensão cisalhante é dada pelo gradiente da velocidade axial junto à parede,  $\frac{\partial u_z}{\partial r}$ .

Apesar de não ter sido possível obter medidas de velocidade muito próximos às paredes devido à problemas de refração da luz associados à técnica de PIV, uma observação dos perfis de velocidade axial mostrados nas figuras (4.25) a (4.29) mostra um aumento no gradiente de velocidade juntos às paredes quando comparado ao caso onde não há rotação. Nos menores valores de número de Reynolds axial, 225 e 332 (figuras 4.25 e 4.26) a alteração no gradiente de velocidade é mais notada junto à parede interna ( $y/\delta = 2$ ). Já para  $Re_{axial}$  igual a 622 e 980 (figuras 4.27 e 4.28) o aumento

no gradiente de velocidade é notado em ambas as paredes, justificando o maior aumento do fator de atrito à medida que o número de Reynolds axial de transição é atingido.

Para os casos onde prevalece o escoamento turbulento apresentados apresentados nas figuras (4.30) a (4.33) notam-se pequenas diferenças nos gradiente de velocidade junto às paredes causados pela rotação do cilindro interno. Este fato justifica a pequena variação observada no fator de atrito hidrodinâmico para maiores valores de números de Reynolds axial.

### Estimativa das flutuações de velocidade

Para complementar a análise dos campos de velocidade instantâneos obtidos com os experimentos realizados, foram estimados os valores das flutuações de velocidade no escoamento anular com rotação. Para isso foi calculado o valor da velocidade axial média quadrática em um ponto próximo à parede do cilindro interno (velocidade rms). A velocidade média quadrática,  $u'$ , foi obtida pela equação (4-8).

$$u'^2 = \frac{1}{N} \sum_i^N \left[ (u_i - U)^2 \right] \quad (4-8)$$

onde  $u_i$  representa a velocidade instantânea em um dado ponto do escoamento,  $U$  a velocidade média na seção do escoamento (média temporal e espacial) e  $N$  o número de amostras da série temporal de velocidade, no caso dos experimentos realizados,  $N = 150$ .

O ponto para o cálculo de  $u'$  foi escolhido na coordenada adimensional  $y/\delta = 1,65$ , próximo portanto da parede interna do espaço anular. A figura (4.34) apresenta os resultados obtidos para  $u'$ . Na figura a velocidade rms é apresentada na ordenada adimensionalizada pela velocidade média no espaço anular. Na abscissa os valores de números de Reynolds axial são representados em escala logarítmica. Três valores da rotação do cilindro interno são apresentados, para  $Re_{rot}$  igual a 0, 300 e 900.

Os resultados da figura (4.34) mostram grandes flutuações de velocidade presentes no caso de  $Re_{rot} = 900$  e baixos valores de  $Re_{axial}$  refletindo a passagem de grandes vórtices característicos destes escoamento, como apresentado nos campos de velocidade instantâneos. Este níveis de flutuações são significativamente menores para valores de número de Reynolds axial maiores, onde estas estruturas de vórtices são desorganizadas pela intensidade do escoamento axial. Nota-se também que, para valores de números de Reynolds turbulentos, os valores das flutuações das velocidades para os três

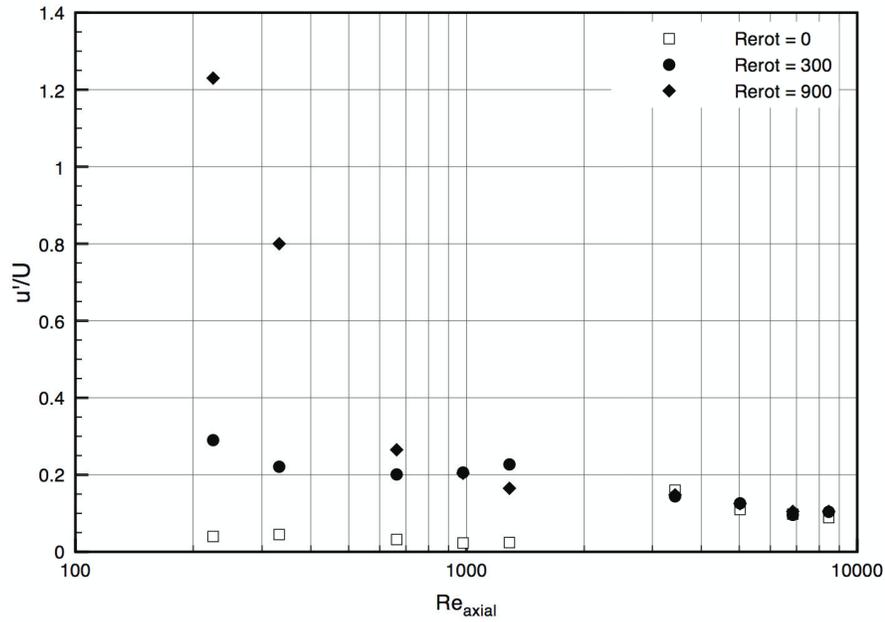


Figura 4.34: Variação da velocidade axial rms com o aumento do  $Re_{axial}$  para a posição  $y/\delta = 1,65$ .

valores de  $Re_{rot}$  são coincidentes, outra indicação que o efeito da rotação do cilindro interno para o regime de escoamento turbulento nos campos de velocidade é praticamente nulo.

Como já foi mencionado anteriormente, devido ao número de campos de velocidade instantâneos obtidos, não foi possível realizar-se uma análise espectral da velocidade axial. Esta análise poderia revelar o surgimento do regime de escoamento turbulento.