

## Referências Bibliográficas

- [1] TSI. **Insight 3G Manual**.
- [2] HART, D. P.. **The elimination of correlation errors in piv processing**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLICATIONS OF LASER TECHNIQUES TO FLUID MECHANICS, 1998.
- [3] CHRISTENSEN, K. T.; SOLOFF, S. M. ; ADRIAN, R. J.. **PIV Sleuth: Integrated Particle Image Velocimetry (PIV) Interrogation/Validation Software**, 2001.
- [4] RABELLO, P. C.; ALVES, D. P.; BARROS, J. M.; LOUREIRO, B. V. ; AZEVEDO, L. F. A.. **Medição do escoamento axial em um espaço com rotação do cilindro interno**. In: CONGRESSO DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA MECÂNICA. Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, August 2004.
- [5] ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W.. **Concentric annular flow with centerbody rotation of a newtonian and a shear-thinning liquid**. International Journal of Heat and Fluid Flow, 16(3):156–162, 1995.
- [6] FOUCAUT, J. M.; MILIAT, B.; PERENNE, N. ; STANISLAS, M.. **Characterization of different piv algorithms using the europiv. sig and real images from a turbulent boundary layer**. Proceedings of the EUROPIV, 2004.
- [7] LOUREIRO, B. V.. **Escoamento secundário em um anular parcialmente obstruído com rotação do cilindro interno**. PhD thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.
- [8] LUEPTOW, R. M.; DOCTER ; A. MIN, K.. **Stability of axial flow in an annulus with a rotating inner cylinder**. Physics of Fluids, 4(11), 1992.

- [9] TÁVARA, D. I. M.. **Queda de pressão em escoamento axial através de região anular com rotação do cilindro interno.** Master's thesis, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005.
- [10] NOURI, J. M.; WHITELOW, J. H.. **Flow of newtonian and non-newtonian fluids in an eccentric annulus with rotation of the inner cylinder.** *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 18:236–246, 1997.
- [11] OOMS, G.; KAMPMAN-REINHARTZ, B. E.. **Influence of drill pipe rotation and eccentricity on pressure drop over borehole during drilling.** *Eur. J. Mech.*, 15(5):695–711, 1996.
- [12] RAFFEL, M.; WILLERT, C. ; KOMPENHANS, J.. **Particle image velocimetry: a practical guide.** Springer, 1998.
- [13] TAYLOR, G. I.. **Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders.** 1923.
- [14] WERELEY, S.; LUEPTOW, R. M.. **Spatio-temporal character of non-wavy and wavy taylor-couette flow.** *Journal of Fluid Mechanics*, 364:59–80, 1998.
- [15] WERELEY, S. T.; LUEPTOW, R. M.. **Velocity field for taylor-couette flow with an axial flow.** *Physics of Fluids*, 11(12), 1999.
- [16] WESTERWEEL, J.. **Fundamentals of digital particle image velocimetry.** *Measurements and Science*, 1997.

## A

### Calibração dos Rotômetros

Este Apêndice apresenta a calibração dos rotômetro e seus procedimentos.

Na saída dos rotômetros foi adaptada uma mangueira  $2\frac{1}{2}$  polegadas. Esta mangueira tinha um comprimento suficiente para entrar na caixa de entrada da seção de teste. Com isso foi garantido a recirculação do fluido pela seção de testes assim como o nível do tanque superior ficasse constante. Foi posicionada ao lado da caixa de entrada uma balança de chão, modelo M-50 da fabricante Marte, com fundo de escala de 50kg e menor divisão de 20g. Uma bombona de 60 litros de capacidade foi utilizada para receber o fluido na vazão desejada. Esta bombona foi posicionada sobre a balança.

Abaixo é descrito o procedimento utilizado para a calibração dos rotômetros. O critério de calibração adotado foi o de marcar o tempo necessário para encher a bombona até atingir um peso pré-estabelecido.

- Ajusta-se a vazão desejada a ser calibrada através das válvulas presentes na entrada e saída do rotômetro. A mangueira está apontada para a caixa de entrada;
- posiciona-se a bombona vazia em cima da balança, e em seguida a balança é tarada;
- rapidamente, a mangueira é apontada para a bombona e ao mesmo tempo aciona-se o cronômetro;
- marca-se o tempo de enchimento até o peso desejado.

Foram feitas duas calibrações com pesos finais diferentes da bombona. As vazões calibradas foram as mesmas utilizadas na realização dos experimentos.

A tabela (A.1) apresenta os valores encontrados pela calibração.

Tabela A.1: Vazões encontradas pela calibração dos rotâmetros.

Vazão Lida (L/h)	Vazão Calibrada (L/h)	Desvio Padrão	Incerteza
Rotâmetro 1000 L/h de fundo de escala			
40	67,41	2,21	3,27%
100	99,46	3,12	3,14%
200	198,52	1,65	0,83%
300	293,34	2,17	0,74%
400	385,62	3,41	0,88%
Rotâmetro 5000 L/h de fundo de escala			
400	472,15	8,64	1,83%
1000	1026,61	7,78	0,76%
1500	1503,94	32,86	2,18%
2000	2050,34	8,84	0,43%
2500	2532,57	40,24	1,59%

## B Análise de Incerteza

Neste apêndice é apresentado o procedimento para a estimativa da incerteza para a pressão e para o fator de atrito.

A incerteza padrão combinada  $\delta_c(y)$  é a raiz quadrada positiva da variância combinada  $\delta_c^2(y)$ , que é dada, se os parâmetros  $x_i$  foram independentes por:

$$\delta_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 \delta^2(x_i) \quad (\text{B-1})$$

sendo que  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$  e  $\frac{\partial y}{\partial x_i} = c_i$ , onde  $c_i$  é denominado o coeficiente de sensibilidade e descreve como o valor de  $y$  varia com as mudanças nos parâmetros  $x_i$ .

### B.1 Análise de incerteza na Pressão Estática

A equação usada para calcular a pressão, em Pa, é dada por:

$$\Delta P = -(\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}})hg \sin(\alpha) \quad (\text{B-2})$$

onde:

$\Delta P$ : Diferença de pressão entre duas tomadas (Pa);

$\rho_{\text{água}}$ : massa específica da água ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ );

$\rho_{\text{óleo}}$ : massa específica da água ( $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ );

$h$ : leitura da diferença de pressão no manômetro ( $m$ );

$g$ : aceleração da gravidade ( $\frac{m}{s^2}$ );

$\sin(\alpha)$ : inclinação do manômetro.

A aceleração da gravidade considerada pelo trabalho foi de  $9,81 \frac{m}{s^2}$ . Entretanto, o laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-Rio possui um documento do Observatório Nacional onde um gravímetro foi usado para medir a aceleração da gravidade. Neste documento, o valor da aceleração

da gravidade é de  $9,7880055 \pm 0,0000003 \text{m/s}^2$ . A diferença entre estes dois valores, o valor usado pelo trabalho e o valor exato, é de 0,225%. Portanto esta diferença trás uma incerteza pequena nos valores finais de pressão. Devido a este fato a incerteza da aceleração da gravidade e sua diferença foi desconsiderada.

A estimativa da incerteza no cálculo da pressão estática é apresentado abaixo.

$$\delta P^2 = \left(\frac{\partial P}{\partial \rho}\right)^2 \delta \rho^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial h}\right)^2 \delta h^2 + \left(\frac{\partial P}{\partial \alpha}\right)^2 \delta \alpha^2 \quad (\text{B-3})$$

E a incerteza relativa:

$$\left(\frac{\delta P}{P}\right)^2 = \left(\frac{\delta \rho_{\text{água}}}{(\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}})}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_{\text{óleo}}}{(\rho_{\text{água}} - \rho_{\text{óleo}})}\right)^2 + \left(\frac{\delta h}{h}\right)^2 + \left(\frac{\delta \alpha}{\tan(\alpha)}\right)^2 \quad (\text{B-4})$$

O valor de incerteza em cada grandeza é:

$$\delta h = \pm 1 \text{mm}$$

$$\delta \rho_{\text{água}} = \pm 1\% \rho_{\text{água}} = \pm 9,89 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\delta \rho_{\text{óleo}} = \pm 1\% \rho_{\text{óleo}} = \pm 8,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\delta \alpha = \pm 1^\circ$$

A estimativa da incerteza na leitura da pressão (Pa) variou entre 17%, para  $Re_{axial} = 633$  e sem rotação do cilindro interno, e 8,9%, para  $Re_{axial} = 8458$  sem rotação do cilindro interno.

## B.2

### Análise de incerteza no fator de atrito

A equação para o cálculo do fator de atrito é:

$$f = \frac{2(\Delta P/L)D_H}{\rho\left(\frac{Q}{A}\right)^2} \quad (\text{B-5})$$

A estimativa na incerteza do fator de atrito pelo método das derivadas é apresentado abaixo.

$$\delta f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial (P/L)}\right)^2 \delta (P/L)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D_H}\right)^2 \delta D_H^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}\right)^2 \delta \rho^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Q}\right)^2 \delta Q^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial A}\right)^2 \delta A^2 \quad (\text{B-6})$$

A incerteza relativa é dada pela expressão abaixo:

$$\left(\frac{\delta f}{f}\right)^2 = \left(\frac{\delta(P/L)}{(P/L)}\right)^2 + \left(\frac{\delta D_H}{D_H}\right)^2 + \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)^2 + \left(-2\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(2\frac{\delta A}{A}\right)^2 \quad (\text{B-7})$$

A determinação do gradiente de pressão foi feito através do ajuste da equação de uma reta aos dados de pressão e posição, pelo método mínimos quadrados. Para a estimativa da incerteza do gradiente de pressão foi utilizado o critério de "perturbação" definido pelo autor. Este método consiste em alterar o valor de uma das pressões e determinar o novo gradiente de pressão. O valor alterado da pressão foi o valor da incerteza estimada para uma dada pressão, estimada pelo procedimento descrito na seção B.1. Para poder utilizar este método de perturbação, foram feitas algumas considerações, como: não existir incerteza na posição (x) das tomadas de pressão; e a incerteza nas pressões da região desenvolvida foram consideradas as iguais.

O valor da incerteza em cada grandeza é:

$$\delta D_H = 1,24 \times 10^{-03} m$$

$$\delta \rho = 9,89 \frac{kg}{m^3}$$

$$\delta A = 1,01 \times 10^{04} m^2$$

Os valores da incerteza na vazão foram utilizados aqueles encontrados na calibração dos rotâmetros.

A estimativa da incerteza no fator de atrito encontrada foi entre 24% e 14%.

### B.3 Análise de Incerteza no campo de velocidade

Os campos de velocidade foram medidos pela técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). A estimativa da incerteza nos campos de velocidades foram analisadas de acordo com Foucaut et al (2003).

Os parâmetros considerados para a análise da incerteza nos campos de velocidade foram o deslocamento e o diâmetro da imagem da partícula.

Foi feito um processamento de imagem para a detecção e medição dos diâmetros das partículas. Para isso foi utilizados o *software ImageJ* de domínio público para este fim. Abaixo é apresentado o passo a passo para a detecção das partículas na imagem.

1. Abre-se um dos pares da imagem a ser analisada;

2. Remove-se algum ruído de fundo com o comando *Subtract Background*;
3. Faz-se a binarização da imagem;
4. Usa-se o comando *Analyse Particles* para a detecção, contagem e medição do diâmetro das partículas. Este comando devolve uma lista com os parâmetros citados;
5. Com esta lista, calcula-se o diâmetro médio e o desvio padrão das imagens das partículas.

A tabela (B.1) mostra o resultado encontrado através do procedimento descrito acima.

Tabela B.1: Resultado encontrado para o diâmetro da imagem da partículas

Nº de partículas	7895
Diâmetro médio (pixels)	3,58
Desvio Padrão (pixels)	1,68

Para um diâmetro médio de 3,5 pixels da imagem das partículas, o erro aleatório (rms) é 0,085pixels e o erros sistemático (bias) é 0,022pixels, como mostra as figuras (B.1) e (B.2)

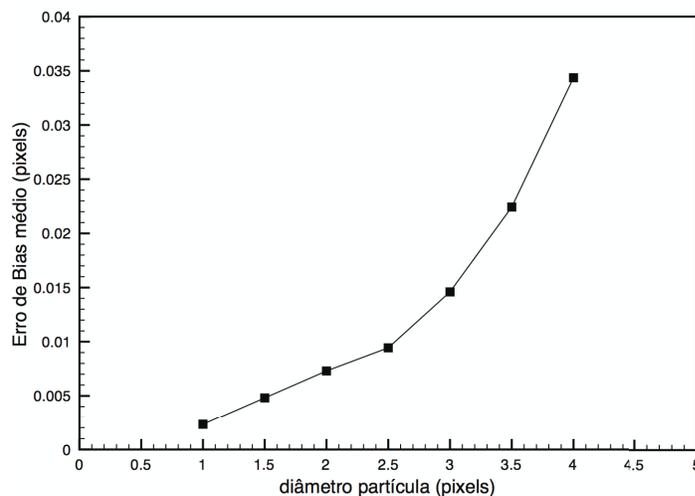


Figura B.1: Erro sistemático no deslocamento para o diâmetro da imagem da partícula. Fonte: Foucaut *et al.* (2004)

Como a técnica recursiva move as janelas do segundo passo em valores inteiros (pixels), então os deslocamentos das partículas só podem ocorrer entre -1 e 1 pixel. Para estimar a esta incerteza, foi analisado um perfil de

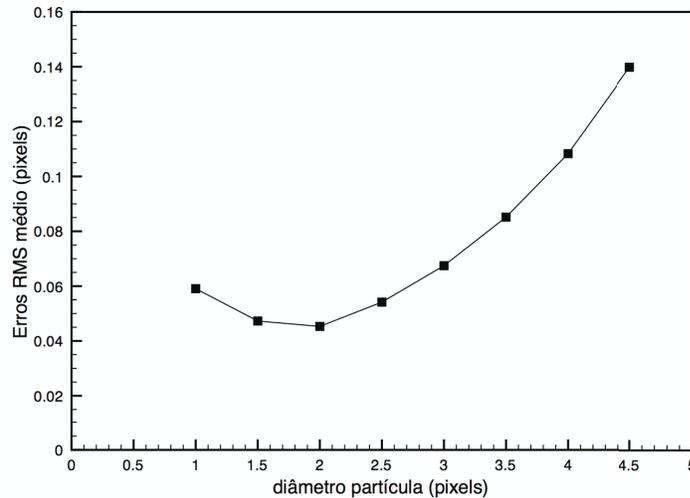


Figura B.2: Erro aleatório no deslocamento para o diâmetro da imagem da partícula. Fonte: Foucaut *et al.* (2004)

deslocamento axial de um campo instantâneo, do caso  $Re_{axial} = 225$  sem rotação do cilindro interno.

Esta análise resultou em uma estimativa da incerteza de 2% para cada campo de velocidade instantâneo.

Outro método de análise da incerteza é comparar os resultados de PIV para um escoamento onde a solução analítica é conhecida a priori para o mesmo, como é o caso do regime laminar do presente trabalho (Raffel *et al.* 1998).

Foi comparado 5 perfis de velocidade axial, obtidos de um mesmo campo instantâneo, com a solução analítica. A diferença média entre os perfis encontrada foi de 2,5%.

## **C**

### **Figuras dos Campos Instatâneos**

Este Apêndice apresenta as figuras dos campos de velocidade instantâneos, como ilustrado no Capítulos 4.

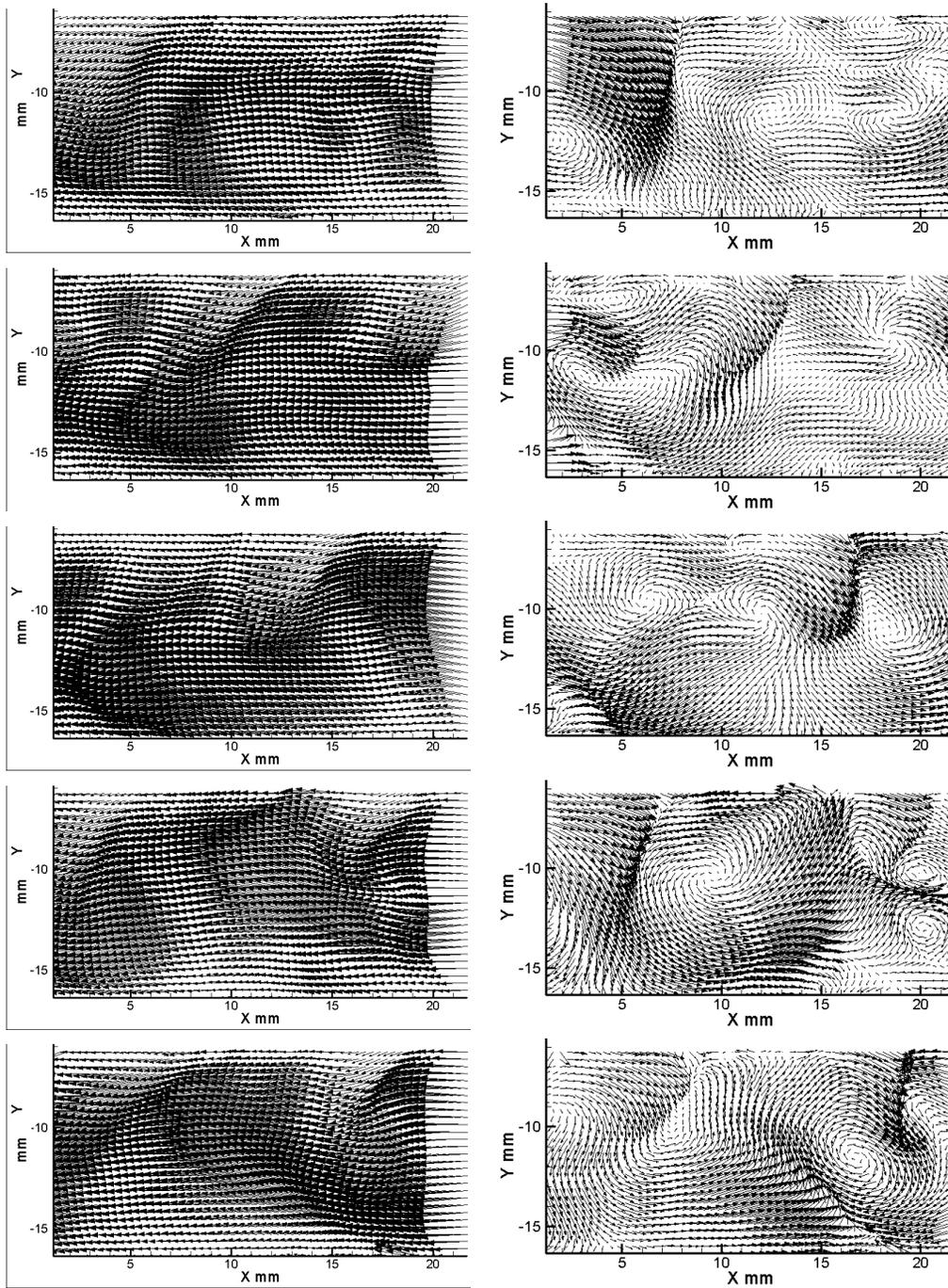


Figura C.1: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,76$  ( $Re_{axial} = 662$  e  $Re_{rot} = 500$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

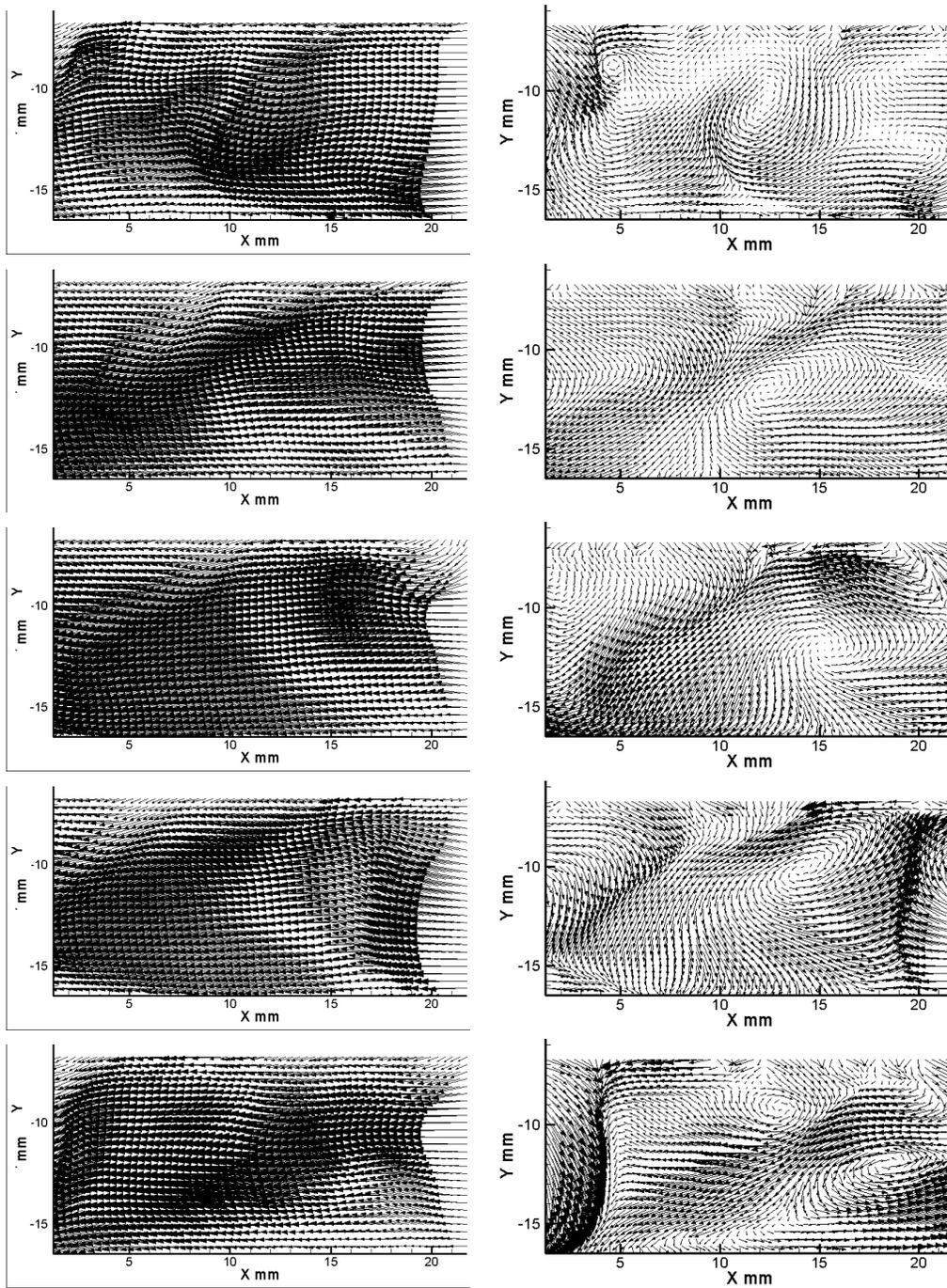


Figura C.2: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=1,06$  ( $Re_{axial} = 662$  e  $Re_{rot} = 700$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

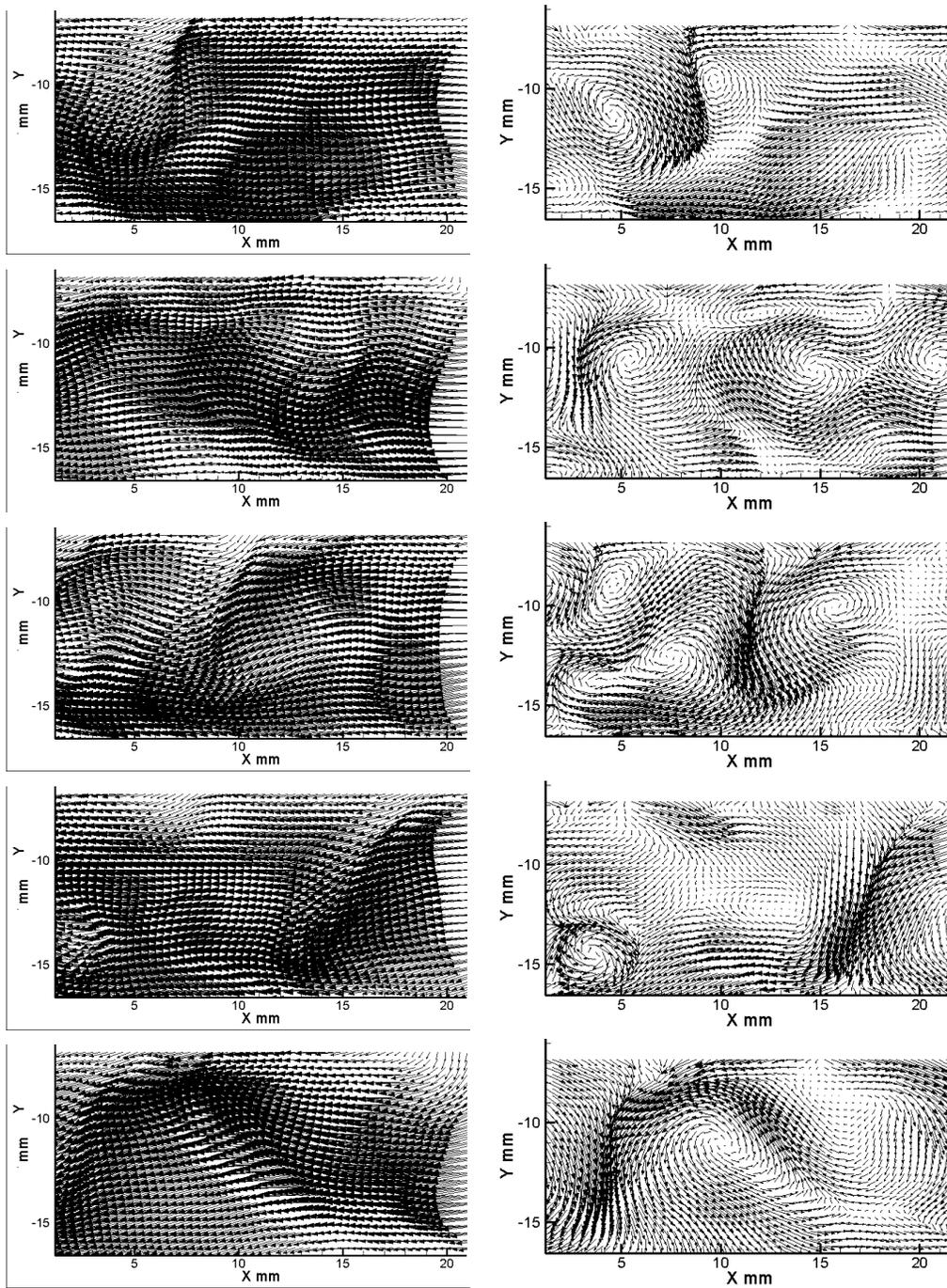


Figura C.3: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=1,36$  ( $Re_{axial} = 662$  e  $Re_{rot} = 900$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

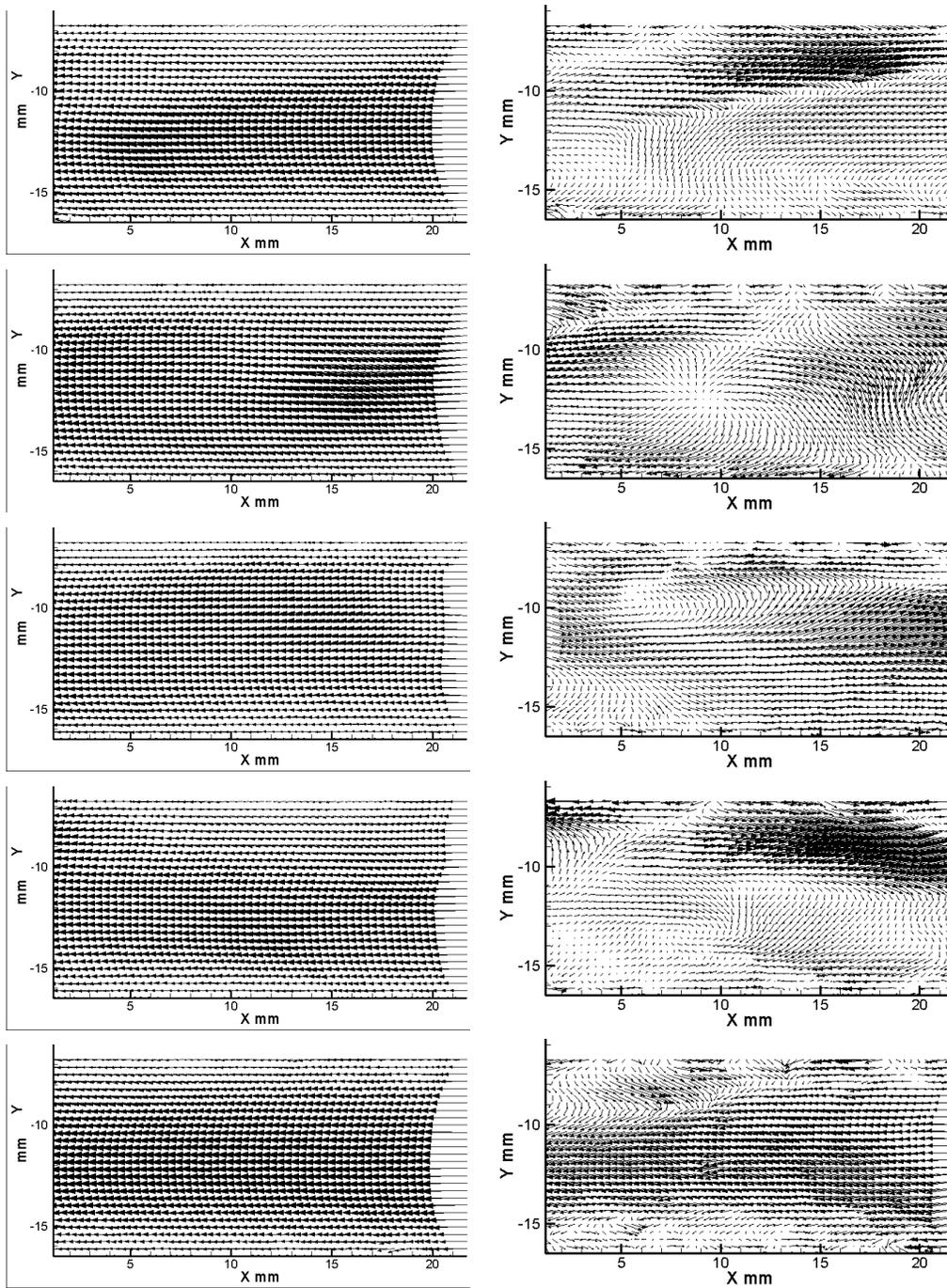


Figura C.4: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,31$  ( $Re_{axial} = 980$  e  $Re_{rot} = 300$ ). Escoamento sem vórtices (ESV).

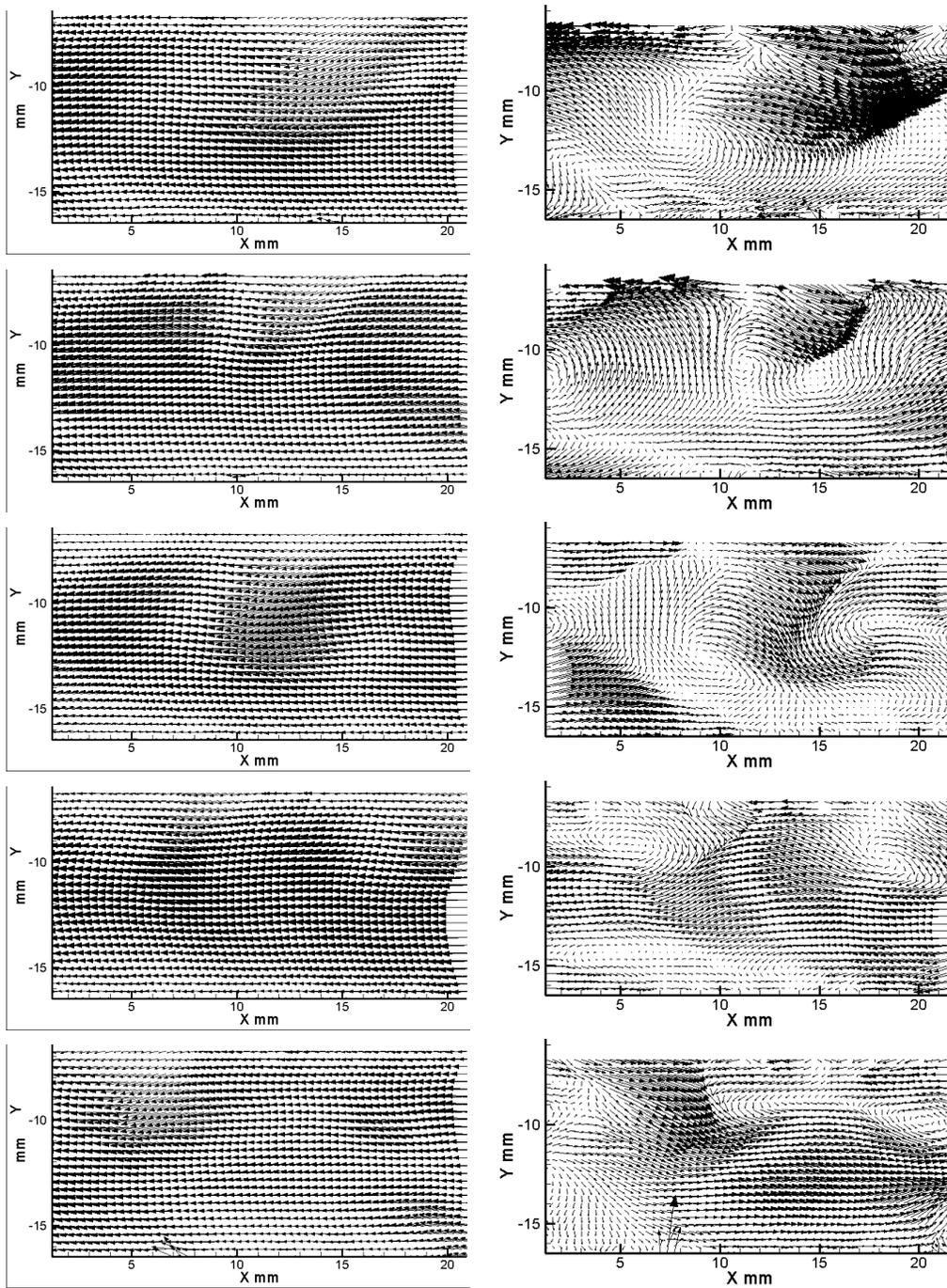


Figura C.5: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,51$  ( $Re_{axial} = 980$  e  $Re_{rot} = 500$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

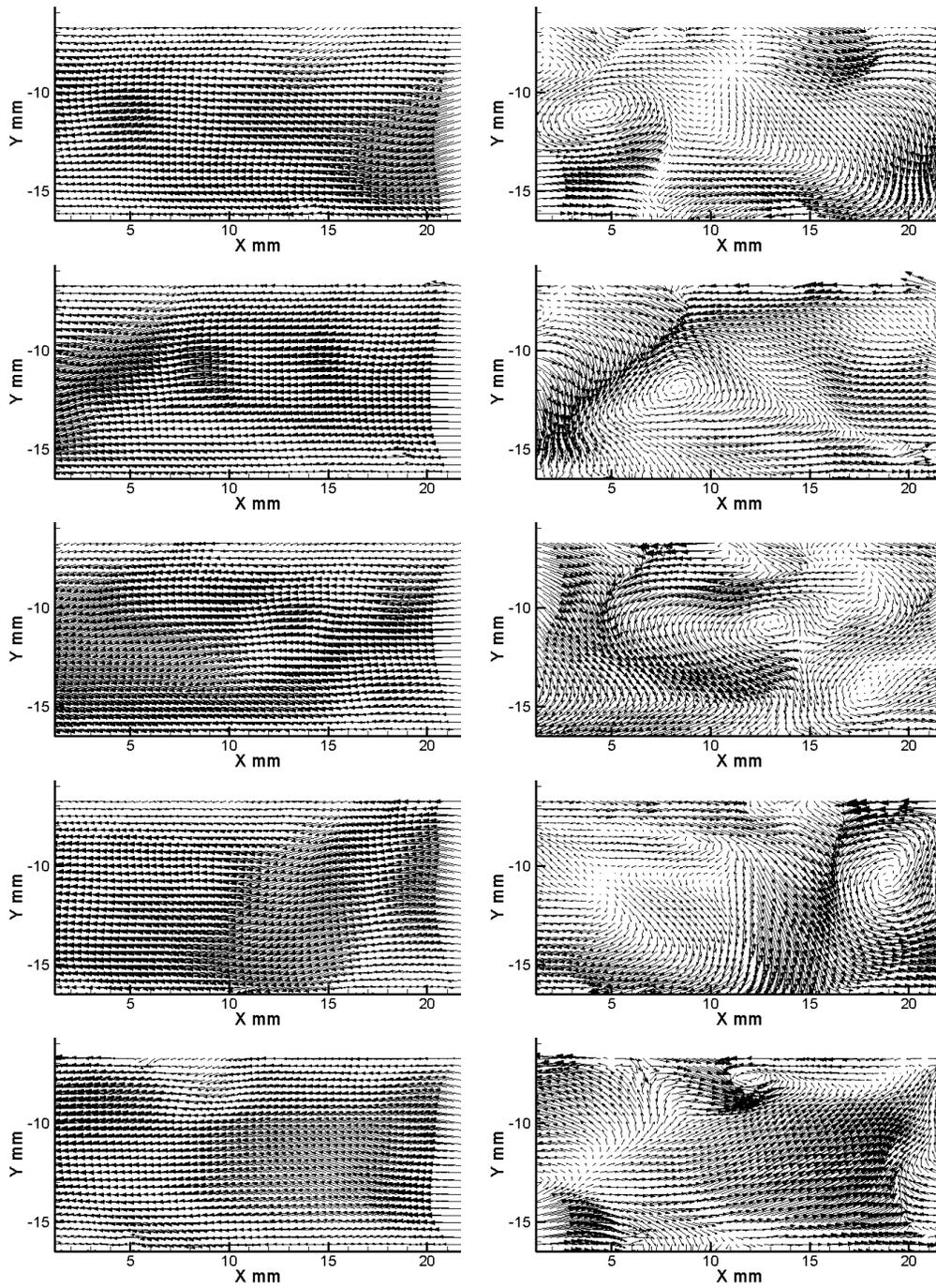


Figura C.6: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,72$  ( $Re_{axial} = 980$  e  $Re_{rot} = 700$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

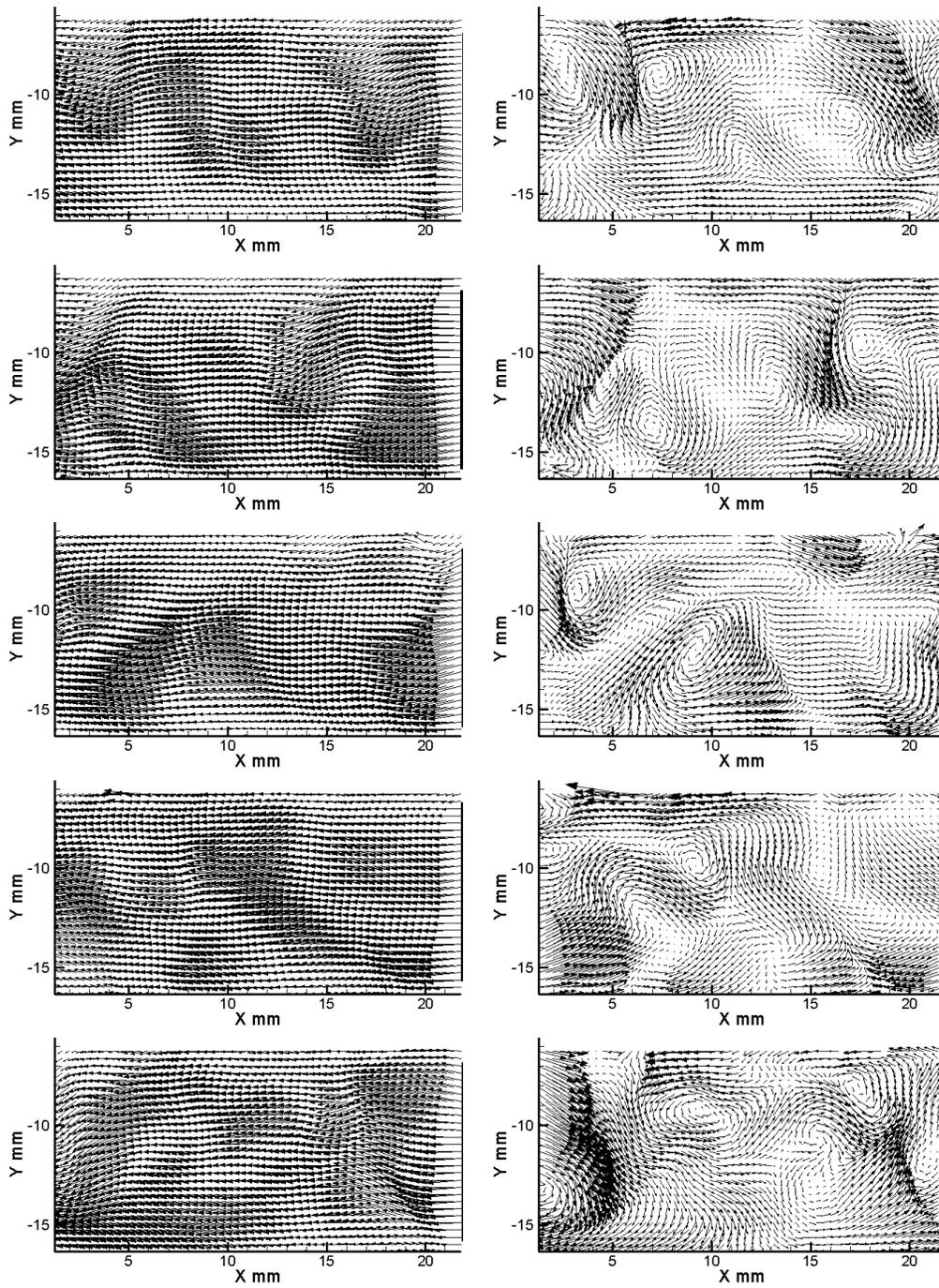


Figura C.7: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,92$  ( $Re_{axial} = 980$  e  $Re_{rot} = 900$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).

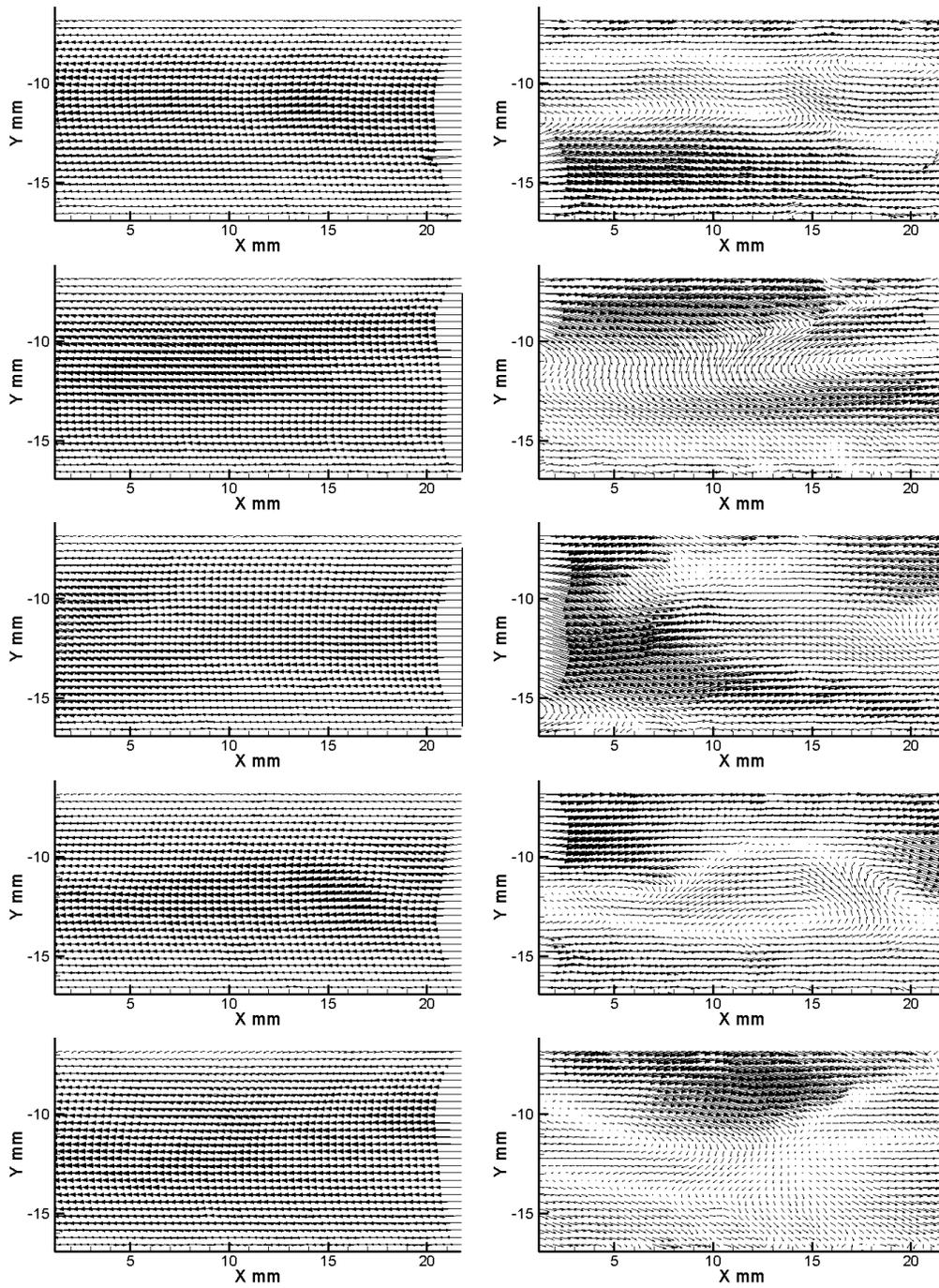


Figura C.8: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,23$  ( $Re_{axial} = 1288$  e  $Re_{rot} = 300$ ). Escoamento sem vórtices (ESV).

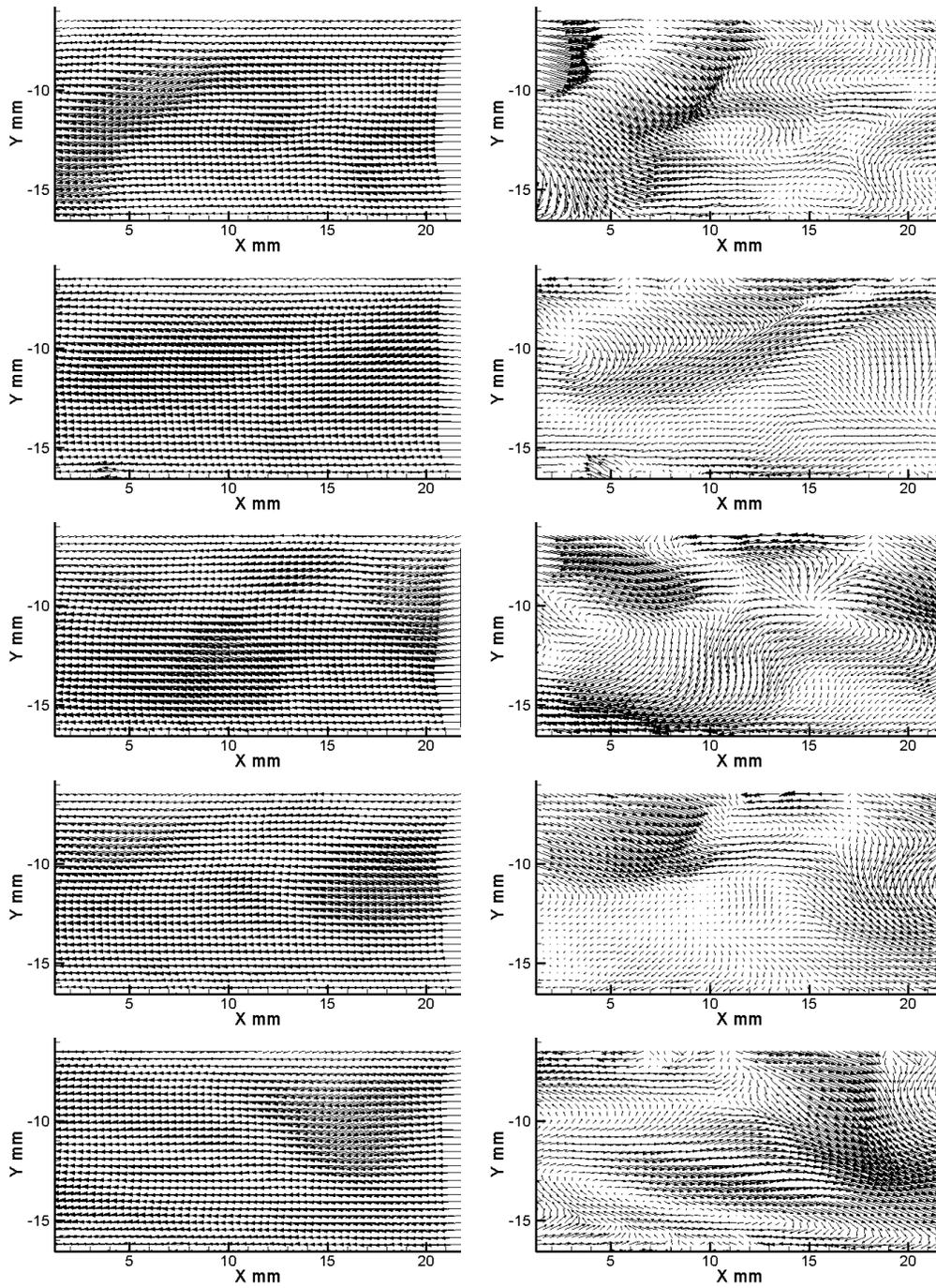


Figura C.9: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,39$  ( $Re_{axial} = 1288$  e  $Re_{rot} = 500$ ). Escoamento sem vórtices (ESV).

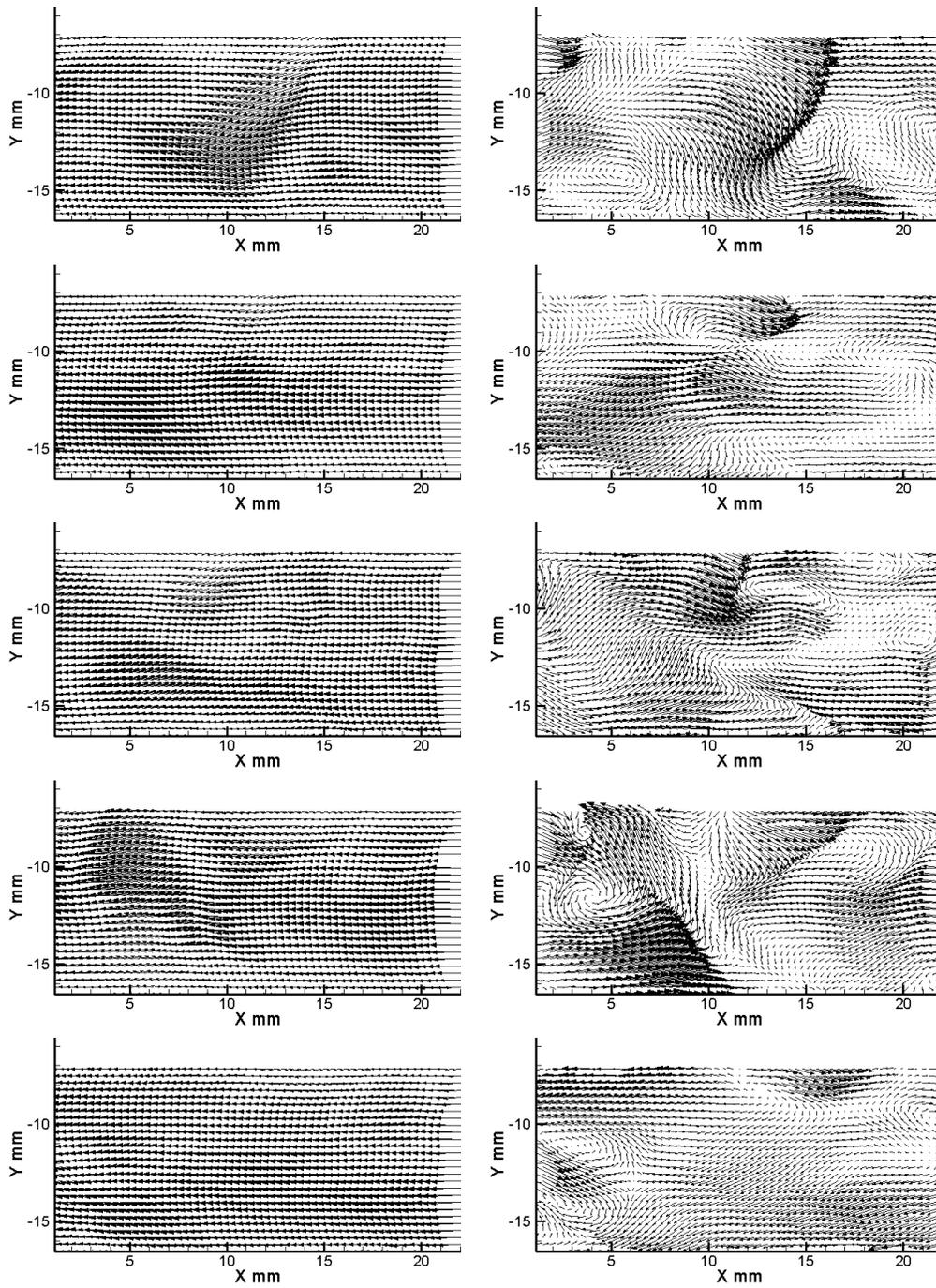


Figura C.10: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,54$  ( $Re_{axial} = 1288$  e  $Re_{rot} = 700$ ). Escoamento sem vórtices (ESV).

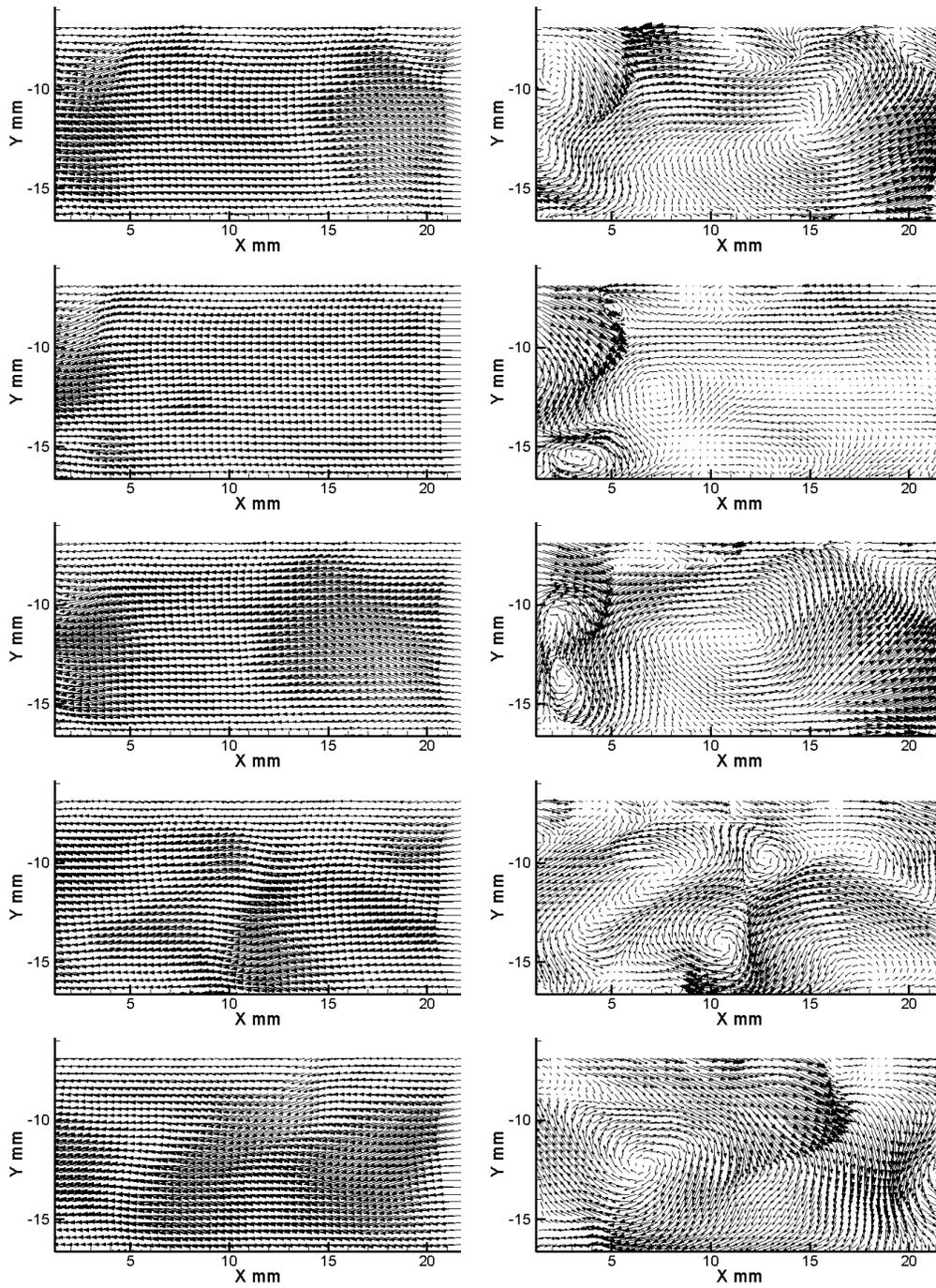


Figura C.11: Campos Instantâneos de Velocidade para  $RR=0,70$  ( $Re_{axial} = 1288$  e  $Re_{rot} = 900$ ). Escoamento com vórtices aleatórios (EVA).