

## CARACTERIZAÇÃO HIDRÁULICA POR IMAGEAMENTO TÚNEL HIDROKINEMÁTICO

Filipe Faria Fornazari (UEPG) E-mail: [filipe.3f@hotmail.com](mailto:filipe.3f@hotmail.com)

Marcos Rogério Szeliga (UEPG) E-mail: [marcosrs@uepg.br](mailto:marcosrs@uepg.br)

**Resumo:** A velocimetria por imagem de partículas – PIV – “Particle Image Velocimetry” – é uma técnica recente de medições de velocidades em escoamentos através de uma metodologia não intrusiva, com ampla aplicação a nível mundial. Para embasamento do desenvolvimento da tecnologia, visando um sistema exclusivamente nacional, além de competitividade com sistemas importados, um dos passos nessa linha de pesquisa está na formulação de metodologia fundamentada numa geometria explícita obtida passo a passo para posterior automatização. A Caracterização Hidráulica por Imageamento consiste na aplicação dos princípios básicos da técnica PIV de forma manual e na obtenção de resultados para efeito de embasar o desenvolvimento do aplicativo automatizado. Os trabalhos são efetivados utilizando um equipamento laboratorial específico, o Túnel Hidrocinemático. O túnel consiste numa bancada de recirculação de água no qual são acoplados modelos sólidos para estudos hidráulicos e com uma configuração apropriada para obtenção de imagens do escoamento semeado com partículas traçadoras. As imagens são produzidas através da incidência em lâmina de um feixe laser na região de estudo. Estas imagens são capturadas com uma câmera de alta velocidade e são tratadas, escaladas adequadamente e trabalhadas num software CAD para obtenção do deslocamento das partículas na unidade de tempo levando a um campo vetorial que define a interferência do corpo sólido sobre o escoamento. Para análise desta interferência, além do campo vetorial de velocidades, são determinados os gráficos de vorticidade do escoamento, levando a uma interpretação contextual da cinemática resultante.

**Palavras-chave:** PIV, Velocimetria por imagens de partículas, Métodos ópticos de medição, Diagnóstico do escoamento, Vorticidade.

### HYDRAULIC CHARACTERIZATION BY IMAGING – WATER TUNNEL

**Abstract:** Particle image velocimetry - PIV - is a recent technique for velocity measurements in flows using a non-intrusive approach with broad application worldwide. In order to support the development of technology, aiming at a purely national system, and competition with imported systems, one stage in this line of research is to formulate a methodology based on geometry obtained step by step for further automation. Hydraulic Characterization by Imaging consists on applying the basic principles of the PIV technique manually and obtaining the results for the purpose of basing the development of automated application. The works are effected using a specific laboratory equipment, the Water Tunnel, that consists on a bench re-circulating water in which solid models are coupled to hydraulic studies and an appropriate setting for imaging of the flow seeded with tracer particles. The images are produced through the incidence of a laser beam in the study region. These images are captured with a high-speed camera and treated appropriately, scaled and worked in CAD software to obtain the displacement of particles in the time unit leading to a vector field that defines the interference of the solid body on the flow. For analysis of this interference, the velocity vector field and vorticity graphics of the flow are determined, leading to interpretation of the resulting hydro kinematics.

**Keywords:** PIV, particle image Velocimetry, optical methods of measurement, flow diagnostics, Vorticity.

## 1. INTRODUÇÃO

As primeiras aplicações comerciais da tecnologia PIV datam de 1997 (LAVISION,

2011). A tecnologia utiliza o processamento digital das imagens produzidas no escoamento por um feixe laser onde as partículas em suspensão são iluminadas e fotografadas no intervalo de dois pulsos do feixe laser em sincronia com a aquisição da imagem. A distribuição das partículas é registrada em quadros sucessivos de um arquivo digital de imagens. Os sistemas convencionais utilizam uma câmera para aquisição de imagens 2D em escoamentos bidimensionais e duas câmeras sincronizadas para imagens 3D de escoamentos onde a terceira componente da velocidade tenha papel relevante. As imagens processadas em software específico conduzem a dados geométricos que registram a distribuição de velocidades na área pesquisada através da obtenção do deslocamento das partículas na unidade de tempo. Os resultados obtidos são representados através de gráficos de distribuição vetorial no sistema de coordenadas, incluindo isolinhas de velocidades, vorticidades e linhas de corrente.

No trabalho “Caracterização Hidráulica por Imageamento – Túnel hidrocinemático” foi desenvolvida uma técnica manual do sistema PIV para embasamento metodológico do sistema automatizado. Esta metodologia compreende a produção e aquisição de imagens, trabalho em sistema CAD para obtenção de campos de velocidades na região de estudo do escoamento em torno de sólidos e obtenção de gráficos de resultados utilizando o software Matlab. Para relacionar as imagens com o espaço real são usadas fotos de calibração. As fotos retratam uma placa com uma malha de calibração com dimensões pré-definidas e posição, em relação ao sistema real de coordenadas, também pré-definida. O posicionamento da malha é controlado por um dispositivo de suporte especialmente projetado para o fim de calibração. As fotos são obtidas de forma padronizada e seu processamento estabelece uma relação entre as imagens obtidas e a forma da malha, definindo parâmetros de calibração utilizados na escala das fotos em software CAD. (SZELIGA & ROMA, 2009).

Os ensaios são realizados no Túnel Hidrocinemático, cuja foto está reproduzida na Figura 1. O túnel consiste numa bancada de recirculação de água no qual são acoplados modelos sólidos para estudos hidráulicos e com uma configuração apropriada para obtenção de imagens do escoamento semeado com partículas traçadoras. Os resultados consistem em gráficos dos campos vetoriais de velocidades e vorticidade do escoamento em torno dos contornos de um modelo sólido acoplado no túnel para proporcionar interferência sobre o escoamento.



Figura 1 – Túnel Hidrocinemático

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O atual desenvolvimento da técnica PIV, a nível mundial, se deve aos recentes avanços no processamento digital de imagens e na capacidade de aquisição destas imagens, especialmente, citando as tecnologias baseadas em dispositivos CCD (Charge Coupled Device) ou CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor). Os sistemas PIV convencionais utilizam uma câmera para imagens 2D em medições de escoamentos bidimensionais e duas ou mais câmeras sincronizadas para obtenção de dados em três dimensões, em escoamentos onde a terceira componente da velocidade tenha papel relevante (DANTEC DYNAMICS, 2011).

Uma instalação experimental de um sistema PIV, tipicamente consiste de vários subsistemas. Conforme RAFFEL, M. et al. (2007) na maioria das aplicações partículas traçadoras que devem ser adicionadas ao escoamento, são iluminadas e seu posicionamento é registrado entre um curto intervalo de tempo. Normalmente a iluminação se faz através de emissão laser em lâmina abrangendo a área de interesse de medição. O registro de imagens, através de câmeras convencionais ou digitais, pode ocorrer em um único frame ou numa seqüência de frames. O intervalo de tempo de exposição na aquisição da imagem deve ser pequeno o suficiente para congelar o movimento das partículas e evitar o efeito “blurring”.

O deslocamento das imagens das partículas é determinado através de técnicas PIV com utilização de metodologias de pós-processamento. Para a avaliação do campo de velocidades, um par de imagens PIV é dividido em pequenas subáreas chamadas de “áreas de interrogação”. O vetor deslocamento local para as imagens das partículas é determinado para cada área de interrogação através de métodos estatísticos – auto-correlação ou correlação cruzada. Assume-se que todas as partículas dentro de uma área de interrogação se movam de forma relativamente homogênea entre as áreas de interrogação da primeira e segunda imagem (RAFFEL, M. et al., 2007).

O Rotacional (rot) de um de um campo vetorial de velocidades (equação 1):

$$\vec{v}(x, y, z) = v_x \vec{i} + v_y \vec{j} + v_z \vec{k} \quad (1)$$

é uma função vetorial que pode ser calculada através do produto vetorial do operador Nabla ( $\nabla$ ) pelo vetor  $\vec{v}$  numa coordenada (x,y,z) – (equação 2):

$$\text{rot}(\vec{v}) = \nabla \times \vec{v}(x, y, z) = \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} - \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \vec{i} + \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} - \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \vec{j} + \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (2)$$

O Rotacional aplicado a uma única coordenada é proporcional ao torque do vetor velocidade em relação a um eixo de referência. Quando o rotacional é aplicado a um campo de velocidades é usual que o conjunto de resultados seja estendido e interpretado como uma característica do escoamento designada como a vorticidade do campo. A vorticidade, em primeira análise, pode proporcionar um panorama da turbulência gerada no escoamento e de sua capacidade de gerar vórtices. A vorticidade é especialmente esclarecedora nas inferências acerca das interações do escoamento com os corpos sólidos estabelecendo uma avaliação da dinâmica relacionada com a conformação geométrica do sólido.

Para um campo bidimensional de velocidades o rotacional (equação 3) resultará num vetor com dimensional de velocidade perpendicular ao plano, conforme pode ser observado no esquema da Figura 2. (JULIANELLI, 2008).

$$\text{rot}(\vec{v}) = \nabla \times \vec{v}(x, y) = \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \vec{k} \quad (3)$$

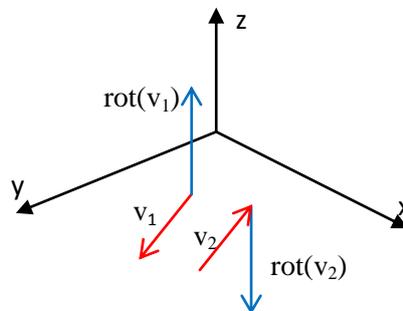


Figura 2 – Vetores velocidade e rotacional em um campo bidimensional de velocidades.

### 3. METODOLOGIA

Os ensaios são realizados no Túnel Hidrocinemático, equipamento desenvolvido durante pesquisas anteriores e que pode ser visualizado na foto da Figura 1. Nele, geram-se escoamentos com variados números de Reynolds, sob controle do operador. O equipamento conta com estruturas de dissipação de turbulência no circuito por motobomba, bem como com paredes de acrílico na região de medição, uma vez que atendem às necessidades de visibilidade do ensaio.

À água que circula no equipamento, foram acrescentadas partículas traçadoras, as quais se tornam visíveis quando iluminadas por um feixe laser. O emissor laser é posicionado verticalmente e abaixo da face inferior da região em acrílico do túnel hidrocinemático. O feixe é gerado em lâmina, de modo que define um plano no escoamento, no qual as partículas nele contidas aparecem destacadas. Como algumas destas partículas ficam visíveis por certo tempo durante o escoamento, rastrear as diversas posições que cada uma delas ocupa em definidos intervalos de tempo permite obter o deslocamento das mesmas, bem como definir um perfil de velocidades para o escoamento.

Para tanto, utiliza-se uma câmera digital de alta velocidade como dispositivo de aquisição de imagens. Para garantir a qualidade das imagens, essencial ao processamento das mesmas, é necessário ajustar o foco da câmera e adequar a posição da mesma, bem como do emissor laser, garantindo imagens nítidas e bem contrastadas. Para tanto, deve-se dar especial atenção à iluminação do ambiente de ensaio (em geral, deve ser o mais escuro possível, destacando a iluminação do feixe laser) associada à velocidade de obturação da câmera. Movimentos rápidos expostos por tempo em excesso geram o efeito “blurring”, traços borrados na imagem que podem até inviabilizar o processamento. Para os ensaios relatados neste artigo, utilizou-se velocidade de aquisição de 60 fps.

Para facilitar as medições sobre as imagens, utilizou-se um processo prático de calibração. Neste, captura-se a imagem de um alvo de calibração que contém uma malha de pontos espaçados num “grid” de 5 mm. O alvo é posicionado no plano definido pelo feixe laser. Deste modo se estabelece uma relação que se conserva durante a consecução dos ensaios, a qual guarda fatores que englobam todas as variáveis que poderiam influir na definição de valores.

Obtida a imagem do alvo de calibração, realiza-se o ensaio, adquirindo as imagens do escoamento. As características do túnel hidrocinemático permitem variados tipos de ensaio, sendo que, para esta etapa de pesquisa, optou-se por realizar o ensaio do escoamento em torno de um cilindro. Como o objetivo desta etapa da pesquisa é realizar o processamento das imagens de forma manual, para subsidiar o desenvolvimento de um software que automatize os processos, utilizou-se de uma técnica de processamento em software CAD.

Na metodologia CAD insere-se a imagem do alvo de calibração e mede-se a distância na imagem de entre os pontos do grid de forma a obter-se uma escala entre os comprimentos na imagem e o comprimento real. Assim, a imagem é corrigida para que esta apresente as dimensões reais. Das imagens obtidas durante o ensaio de escoamento, escolhe-se uma sequência de cinco ou seis que apresentem a qualidade necessária ao processamento, ou que representem uma particularidade do escoamento, a qual se pretende estudar. As imagens são igualmente corrigidas conforme o processo de calibração. Sobre as partículas identificadas nas sequências de imagens são traçadas polilinhas que definem vetores de deslocamento.

Como as partículas se deslocaram no intervalo de tempo entre a aquisição de um par sucessivo de imagens, a velocidade é definida pelo deslocamento dividido pelo intervalo de tempo de aquisição. Como algumas partículas simplesmente não aparecem na segunda imagem, possivelmente porque saíram do plano definido pelo feixe laser, estas são excluídas do rastreamento.

O processo se repete para cada par de imagens determinando deslocamentos contínuos. Ao fim do processo, percebe-se claramente o deslocamento das partículas que estiveram visíveis em toda a sequência.

Mede-se o vetor deslocamento para cada partícula rastreada, transferindo essas medições para planilhas organizadas em forma de um grid 50x50 mm. Cada célula da planilha corresponde a um ponto individual de vetor deslocamento aplicado. São definidos os deslocamentos nas direções x e y bem como os vetores resultantes de deslocamentos e velocidades. Como a velocidade de obtenção é de 60 fps, o intervalo de tempo entre duas imagens é de 1/60 s. Para uma sequência de cinco imagens, há quatro intervalos; logo se divide o vetor deslocamento por 4/60 s, obtendo as velocidades.

Para completar as células sem informação, onde não foi possível obter dados no ensaio, utiliza-se a média dos valores das células vizinhas, partindo daquelas com maior número de informações em seu entorno. À medida que um valor não conhecido é obtido, o mesmo é considerado no cálculo de outros valores adjacentes a ele. Obtidos os quadros de velocidades segundo suas componentes horizontal (eixo x) e vertical (eixo y), estes são trabalhados no software MatLab, a fim de plotar o gráfico do campo de velocidades do escoamento, bem como o gráfico que permite a análise da vorticidade através do Rotacional deste campo.

#### 4. RESULTADOS

Os resultados consistem na obtenção de campos vetoriais lançados sobre as imagens de aquisição e a extrapolação do campo vetorial para uma malha 50x50 mm adjacente do corpo sólido de interferência – cilindro – calculada em planilhas. A partir destes valores são obtidos gráficos para visualização do campo vetorial de velocidades e da vorticidade do escoamento.

Os ensaios foram realizados alterando a velocidade geral do escoamento e dividem-se em escoamento de velocidade lenta – VL – e escoamento de velocidade média – VM.

4.1 ENSAIO VL-01

Medidas de velocidades em torno de um cilindro com escoamento geral lento. Primeira situação de medição.

Nesta situação, através da Figura 3, são apresentados o rastreamento das partículas e os vetores obtidos. As planilhas de resultados numéricos são apresentadas nos Quadros 1, 2 e 3. O campo de velocidades resultante pode ser visualizado através da Figura 4 e a vorticidade do escoamento é apresentado através da Figura 5.

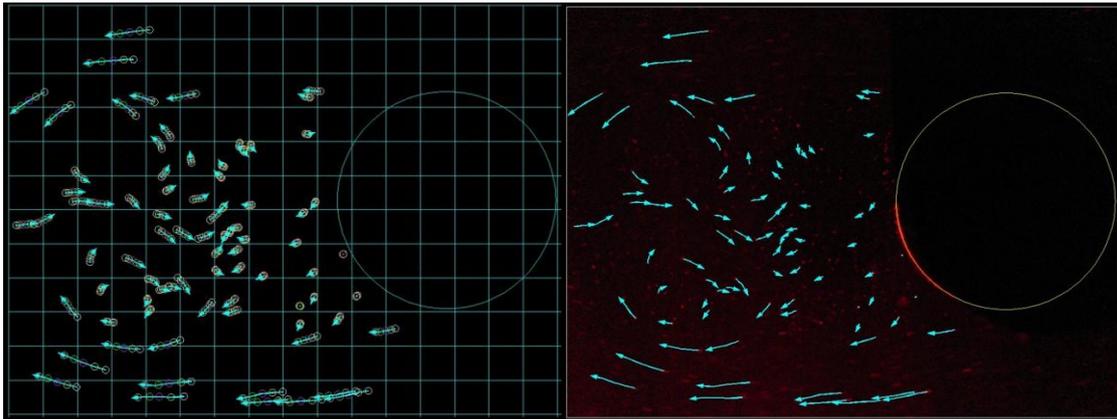


Figura 3 – Rastreamento de partículas no ensaio VL-01 e lançamento dos vetores sobre a imagem de aquisição.

Quadro 1 – Velocidades obtidas para o ensaio VL-01

mm	Módulo da velocidade (mm/s)												
57,5	85,76	89,30	93,54	90,47	84,37	78,46	71,93	69,37	60,59	50,78	44,39	41,89	
52,5	80,03	82,41	85,27	96,62	72,63	65,43	66,81	51,81	40,99	38,01	39,40	38,19	
47,5	62,45	67,59	69,36	58,33	43,58	51,65	37,78	26,57	13,75	24,57	27,08		
42,5	36,53	23,09	27,52	49,98	23,71	22,05	18,91	4,97	7,10	6,48			
37,5	12,80	29,06	10,44	10,37	22,96	11,87	4,56	7,87	3,88	3,73			
32,5	27,79	29,74	38,68	18,79	14,00	23,75	5,56	9,36	6,20	6,48			
27,5	33,59	26,30	23,48	21,32	28,18	23,34	6,17	5,28	11,50	5,49			
22,5	14,74	13,09	19,95	35,45	30,87	9,02	2,89	5,25	4,84	0,83			
17,5	32,86	28,70	10,68	4,21	6,27	29,37	19,75	9,22	1,95	7,22	3,58		
12,5	58,67	44,73	29,97	16,08	59,79	25,87	42,13	37,99	23,01	12,68	34,49	43,85	
7,5	67,27	68,13	96,25	65,94	63,17	69,75	75,61	74,07	62,37	59,31	57,06	63,07	
2,5	76,81	85,78	90,98	93,61	86,43	101,49	94,90	88,59	89,13	92,35	81,91	69,48	
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm	

Quadro 2 – Componentes horizontais das velocidades obtidas para o ensaio VL-01

mm	Componente horizontal da velocidade (mm/s)												
57,5	-84,39	-88,49	-93,18	-90,02	-83,72	-78,10	-71,71	-69,09	-60,39	-50,67	-44,33	-41,86	
52,5	-77,21	-80,28	-83,80	-96,33	-72,48	-65,32	-66,48	-51,69	-40,95	-38,00	-39,38	-38,16	
47,5	-58,32	-55,67	-68,97	-58,04	-41,53	-50,78	-37,73	-26,53	-13,46	-24,51	-27,08		
42,5	-28,33	-20,14	-27,39	-39,69	-14,41	-20,42	-18,84	-4,54	7,06	-6,43			
37,5	5,93	20,81	10,41	-0,60	-11,62	-2,16	-1,98	0,97	-1,00	-0,25			
32,5	27,60	29,72	38,47	13,74	9,90	23,20	-1,60	-9,33	-2,70	-4,37			
27,5	32,27	26,10	23,31	20,53	24,66	19,69	-5,23	-4,73	-9,79	-3,98			
22,5	5,19	8,23	5,21	32,15	19,60	3,29	-0,85	-4,43	-3,93	0,51			
17,5	-22,02	-18,64	5,20	-0,94	4,62	-18,89	-17,32	-7,92	0,36	-5,63	-2,55		
12,5	-50,35	-27,32	-25,94	-15,93	-57,47	-22,26	-40,52	-37,10	-21,39	-6,77	-33,58	-43,13	
7,5	-61,17	-62,56	-90,70	-64,49	-63,17	-68,90	-74,91	-73,42	-61,69	-58,59	-56,27	-62,13	
2,5	-72,45	-82,34	-86,52	-88,61	-86,30	-101,38	-94,46	-87,54	-88,82	-92,21	-80,66	-68,47	
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm	

Quadro 3 – Componentes verticais das velocidades obtidas para o ensaio VL-01

mm	Componente vertical da velocidade (mm/s)											
57,5	-15,30	-12,01	-8,25	-9,00	-10,52	-7,58	-5,69	-6,15	-4,84	-3,38	-2,25	-1,75
52,5	-21,05	-18,59	-15,77	-7,49	-4,64	-3,79	-6,62	-3,53	-1,91	-1,12	-1,25	-1,40
47,5	-22,32	-38,32	-7,34	5,75	13,21	-9,42	-1,98	-1,50	2,79	1,75	-0,34	
42,5	-23,06	-11,30	-2,67	30,37	18,83	8,33	1,62	-2,01	-0,78	-0,74		
37,5	-11,35	-20,29	0,80	10,35	19,81	11,67	-4,11	-7,81	-3,75	-3,72		
32,5	-3,26	1,18	-3,99	-12,81	9,90	5,09	5,33	-0,83	-5,58	-4,79		
27,5	9,33	3,28	-2,84	-5,72	-13,64	12,53	-3,29	-2,35	-6,04	-3,78		
22,5	13,80	10,17	19,26	-14,93	-23,85	-8,40	-2,76	-2,82	-2,83	-0,66		
17,5	24,39	21,83	9,33	-4,10	-4,23	-22,49	-9,49	-4,72	-1,91	-4,52	-2,51	
12,5	30,12	35,42	15,01	2,19	-16,49	-13,17	-11,55	-8,18	-8,50	-10,72	-7,88	-7,90
7,5	27,99	26,97	32,22	13,73	0,72	-10,87	-10,29	-9,79	-9,18	-9,19	-9,43	-10,85
2,5	25,51	24,05	28,13	30,18	4,87	-4,69	-9,14	-13,59	-7,42	-5,10	-14,24	-11,84
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm

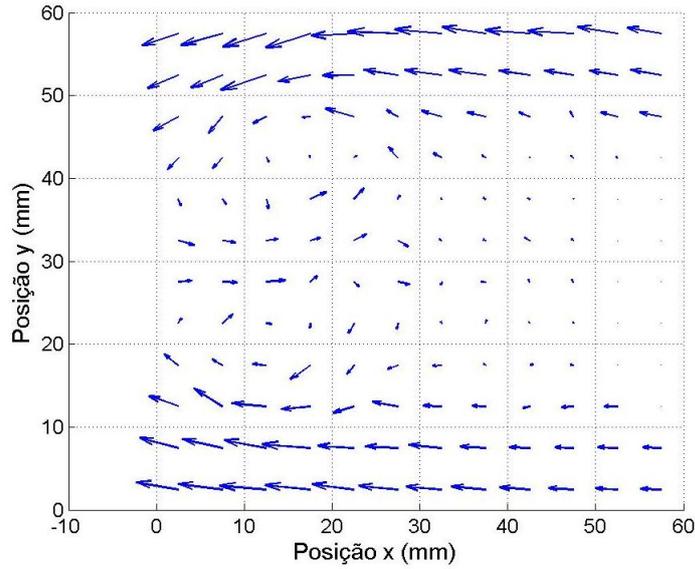


Figura 4 – Campo de Velocidades – Ensaio VL-01.

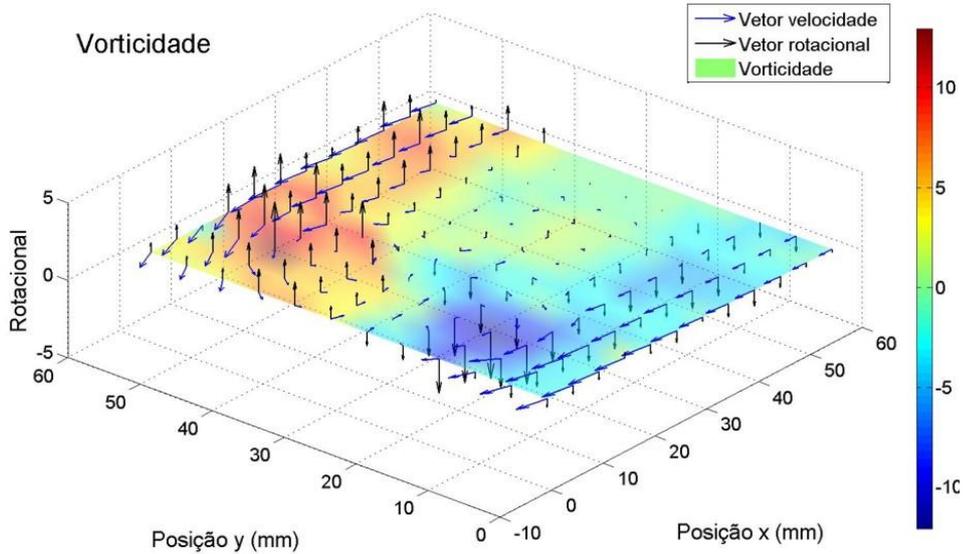


Figura 5 – Vorticidade para o ensaio VL-01

4.2 ENSAIO VL-02

Medidas de velocidades em torno de um cilindro com escoamento geral lento. Segunda situação de medição.

O campo de velocidades resultante pode ser visualizado através da Figura 6 e a vorticidade do escoamento é apresentada através da Figura 7.

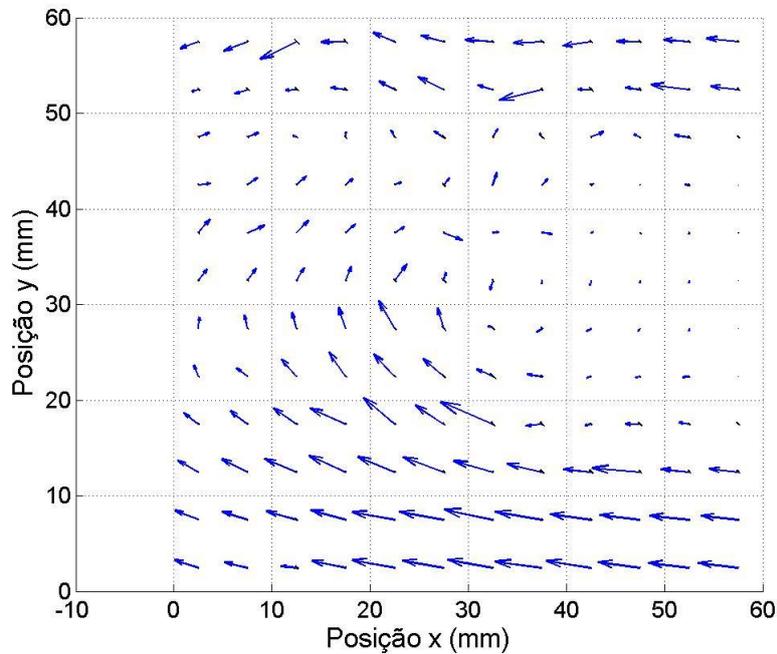


Figura 6 – Campo de Velocidades no ensaio VL-02.

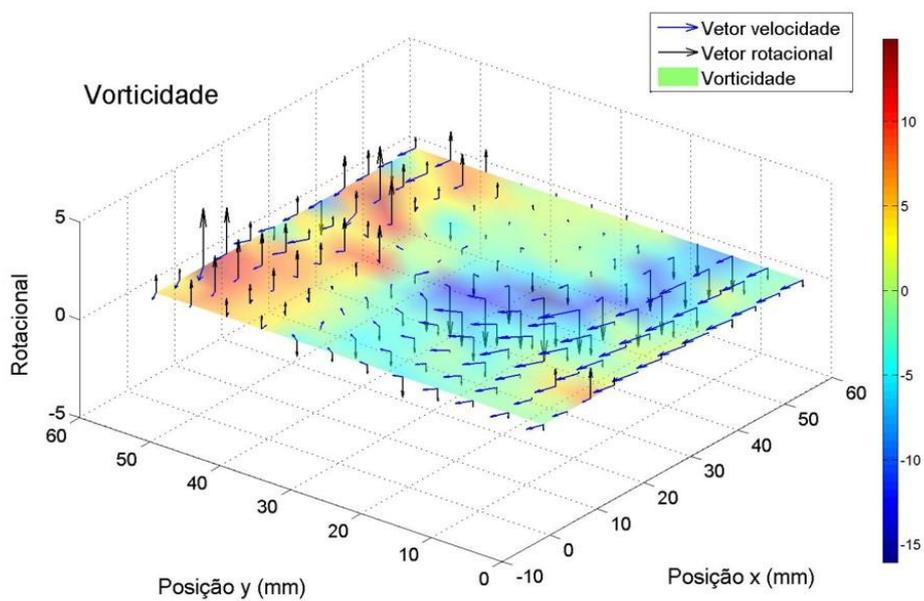


Figura 7 – Gráfico de vorticidade para o ensaio VL-02

### 4.3 ENSAIO VM-01

Medidas de velocidades em torno de um cilindro com escoamento geral a uma intensidade média de velocidade. Primeira situação de medição. A Figura 8 é a reprodução do resultado de rastreamento de partículas no ensaio VM-01, ao qual foi adicionado o contorno do cilindro.

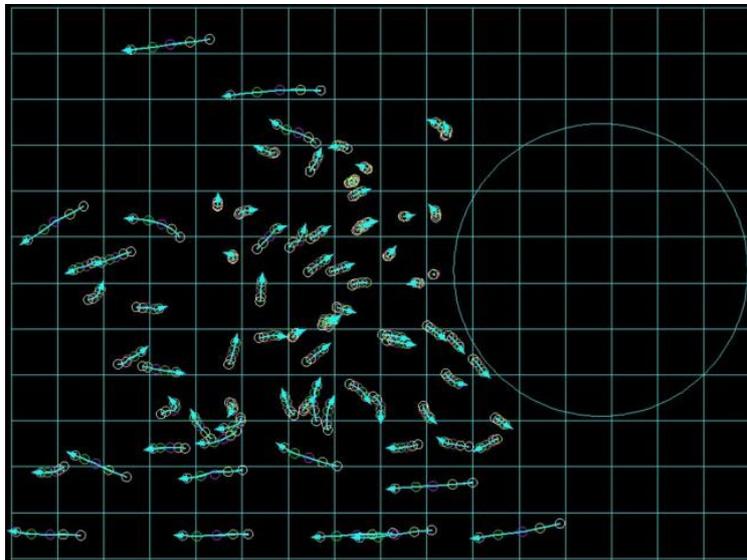


Figura 8 – Rastreamento de partículas no ensaio VM-01

Na Figura 9 apresenta-se o gráfico resultante para o campo de velocidades do ensaio VM-01. Na Figura 10 pode-se observar a vorticidade do escoamento para o ensaio VM-01. As planilhas numéricas do ensaio estão incluídas nos Quadros 4, 5 e 6.

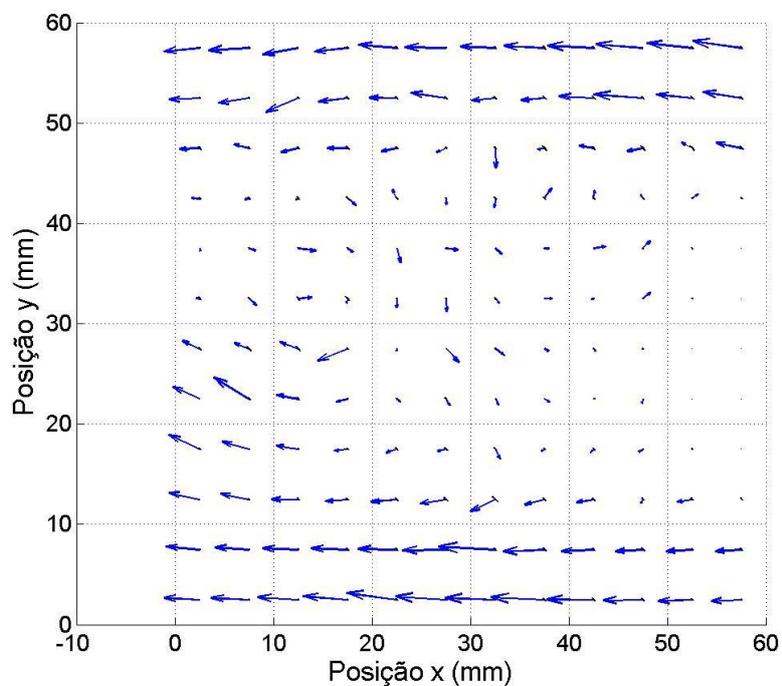


Figura 9 – Campo de Velocidades no ensaio VM-01.

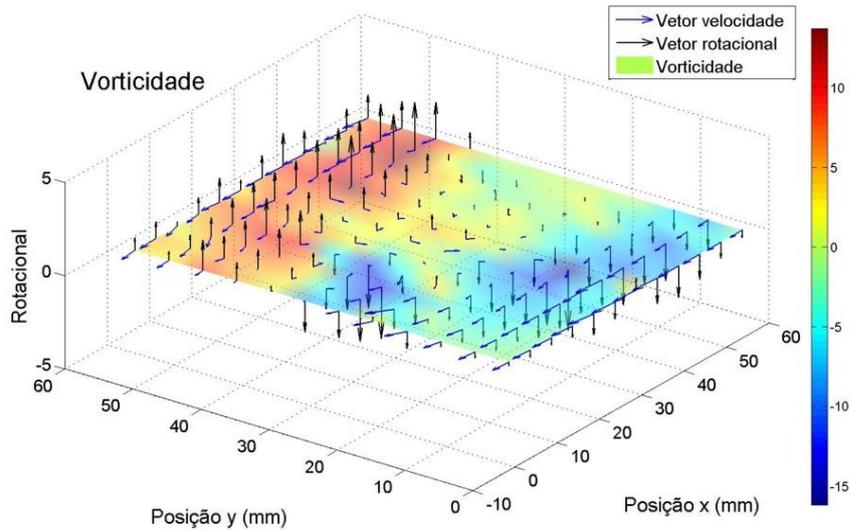


Figura 10 – Gráfico de vorticidade para o ensaio VM-01

Quadro 4 – Velocidades obtidas para o ensaio VM-01

mm	Módulo da velocidade (mm/s)											
57,5	92,63	98,00	103,91	114,59	129,23	129,18	129,32	137,92	121,58	102,80	87,06	76,80
52,5	87,87	87,27	92,09	93,27	100,36	112,45	146,53	105,49	84,10	71,35	66,57	67,21
47,5	80,56	74,01	69,03	57,10	66,69	66,78	69,89	52,30	43,68	10,30	38,66	
42,5	87,22	70,29	56,47	34,16	28,45	21,51	28,50	7,93	10,50	12,45		
37,5	75,42	105,82	57,01	29,43	11,23	18,27	17,11	16,15	5,03	11,14		
32,5	48,89	40,08	50,97	81,88	6,28	47,84	29,12	11,97	6,91	2,34		
27,5	8,75	26,09	36,44	11,31	23,59	32,88	15,86	20,28	6,34	25,31		
22,5	6,19	18,01	46,46	16,69	36,98	31,86	22,59	11,92	32,54	26,28		
17,5	20,52	10,49	6,27	28,22	24,37	16,20	23,45	32,48	19,92	10,75	18,78	
12,5	51,44	38,96	45,25	52,26	40,37	25,37	50,62	17,41	37,83	41,31	29,98	65,33
7,5	78,59	80,04	90,28	74,78	71,57	91,43	61,35	60,68	88,73	126,55	92,90	99,45
2,5	92,50	105,16	92,32	84,80	98,67	106,28	90,25	103,65	118,57	120,84	117,47	125,42
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm

Quadro 5 – Componentes horizontais das velocidades obtidas para o ensaio VM-01

mm	Componente horizontal da velocidade (mm/s)											
57,5	-92,47	-97,86	-103,71	-114,21	-128,07	-128,94	-129,23	-137,78	-121,58	-102,79	-87,00	-76,71
52,5	-87,56	-87,08	-92,02	-93,20	-100,35	-112,43	-146,33	-105,37	-84,00	-71,22	-66,41	-67,07
47,5	-78,91	-72,81	-69,03	-56,94	-66,43	-65,89	-62,90	-50,63	-43,08	-4,64	-38,15	
42,5	-79,23	-67,90	-55,87	-33,95	-27,04	-20,98	13,21	-6,51	-7,32	-10,31		
37,5	-68,76	-90,56	-56,13	-28,59	8,46	9,65	9,70	14,36	5,03	-1,53		
32,5	-44,26	-37,37	-47,87	-76,26	-0,26	33,78	23,66	10,42	4,83	-2,26		
27,5	-8,64	19,64	36,36	-2,00	0,45	2,66	11,04	20,27	-6,26	20,17		
22,5	1,53	17,29	46,15	14,27	11,13	31,67	17,49	11,92	32,16	18,63		
17,5	-20,52	-10,30	-5,42	22,12	-10,92	1,51	-1,52	19,63	2,58	-5,06	15,56	
12,5	-51,40	-37,67	-44,26	-52,26	-39,63	-23,12	2,33	-17,16	-37,34	-40,58	-26,39	-63,91
7,5	-78,48	-79,16	-83,11	-74,30	-71,56	-90,46	-61,10	-60,45	-88,61	-126,20	-92,45	-98,27
2,5	-92,09	-105,02	-90,82	-84,35	-98,36	-106,26	-90,17	-103,51	-118,42	-120,49	-116,86	-124,18
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm

Quadro 6 – Componentes verticais das velocidades obtidas para o ensaio VM-01

mm	Componente vertical da velocidade (mm/s)											
57,5	-5,38	-5,09	-6,43	-9,30	-17,28	-7,77	-4,60	-6,20	-0,61	1,75	3,04	3,81
52,5	-7,36	-5,68	-3,75	-3,56	-1,32	1,79	-7,81	4,99	4,10	4,33	4,58	4,43
47,5	-16,20	-13,29	0,19	4,29	5,80	10,88	30,47	13,11	7,24	9,20	6,27	
42,5	-36,47	-18,20	-8,25	3,81	8,86	4,72	25,25	4,52	7,52	6,98		
37,5	-30,98	-54,75	-9,99	6,97	7,39	15,51	14,09	7,39	-0,10	11,03		
32,5	-20,76	-14,49	-17,49	29,84	6,27	33,87	16,98	5,89	4,94	-0,61		
27,5	-1,40	17,18	-2,48	11,13	23,58	32,77	11,39	-0,40	1,01	-15,29		
22,5	6,00	5,05	5,37	8,66	35,27	3,47	14,30	-0,12	-5,01	-18,54		
17,5	-0,22	2,01	3,16	17,53	-21,78	16,13	23,40	-25,88	-19,75	-9,48	-10,52	
12,5	2,00	-9,93	9,43	-0,34	7,68	10,45	50,57	2,95	-6,02	7,71	-14,23	-13,57
7,5	4,06	11,87	35,26	8,45	-1,05	-13,30	5,55	5,24	-4,59	-9,39	-9,10	-15,24
2,5	8,73	5,59	16,55	8,81	-7,79	-2,27	-3,92	-5,34	-6,10	-9,13	-11,91	-17,63
	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5 mm

#### 4.4 ENSAIO VM-02

Medidas de velocidades em torno de um cilindro com escoamento geral a uma intensidade média de velocidade. Segunda situação de medição. Gráficos nas Figuras 11 e 12.

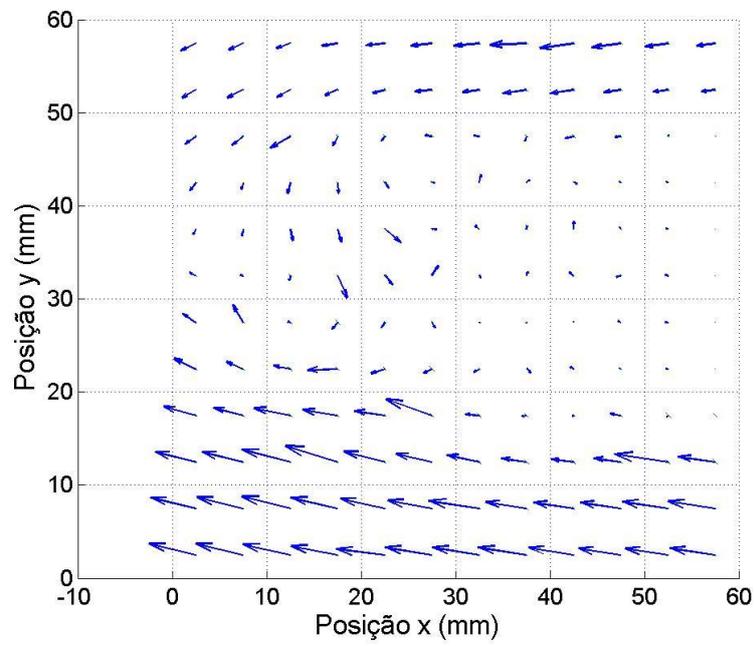


Figura 11 – Campo de velocidades para o ensaio VM-02

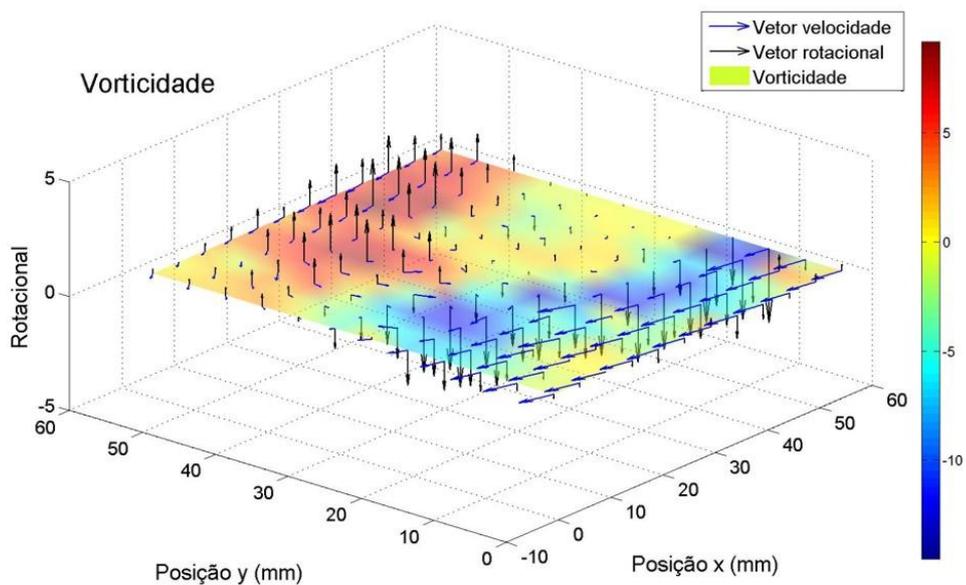


Figura 12 – Gráfico de vorticidade para o ensaio VM-02

## 5. DISCUSSÃO

O trabalho desenvolvido nesta pesquisa tem uma conotação relacionada aos instrumentos de medição em escoamentos com base na técnica PIV. Desta conotação depreende-se a capacidade de obtenção de resultados, ferramentas de visualização e de interpretação do escoamento em torno de modelos sólidos com utilização do Túnel Hidrocinemático. Neste sentido, também estão intrínsecas as necessidades em torno de ferramentas matemáticas para consubstanciar a geometria empregada na obtenção de coordenadas e sua manipulação algébrica. Com o intuito de se obter um sistema de medição com aplicações em diversas áreas do conhecimento tais como a hidrodinâmica, esta etapa define o embasamento para delimitar o intervalo de atuação e as características automatizadas no software aplicativo SPIV-3D desenvolvido em outra pesquisa (SZELIGA & ROMA, 2009). Considerando-se os objetivos propostos, definidos como base para comparação e aferição do sistema automatizado, pode-se considerar que os resultados vieram de encontro às expectativas, salientando-se que se fazem necessários incrementos em termos de potência de iluminação e de capacidade de aquisição dos instrumentos para aplicações profissionais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pelo apoio financeiro ao projeto e à Universidade Estadual de Ponta Grossa pela Bolsa do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica.

## REFERÊNCIAS

DANTEC DYNAMICS. Disponível em <http://www.dantecdynamics.com> . Acesso em junho/2011.

JULIANELLI, J. R. *Cálculo Vetorial e Geometria Analítica*. 1ª Ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna. 320 p. 2008.

LAVISION. FlowMaster Advanced PIV/ PTV Systems for Quantitative Flow Field Analysis. Goettingen: LaVision GmbH. 15 p. Disponível em <http://www.lavision.de>. Acesso em junho/2011.

SZELIGA, M. R.; ROMA, W. N. L. *Estudos de Reaeração com Velocimetria por Imagens de Partículas - Sistema S-PIV-3D*. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, vol.14, n.4, pp. 499-510. 2009.

RAFFEL, M.; WILLERT, C.; WERELEY, S.; KOMPENHANS, J. *Particle Image Velocimetry – A Practical Guide*. Second Edition, New York: Springer Verlag. 448 p. 2007.