3
Técnicas de medição do escoamento

O conhecimento do campo de velocidade de fluidos em movimento é fundamental para o entendimento dos mecanismos básicos que governam a dinâmica do escoamento. Os instrumentos mais utilizados para a medição da velocidade de fluidos são o tubo de Pitot, anemômetro de fio ou filme quente e anemômetro Laser-Doppler. Estas três técnicas de medição fornecem medidas pontuais de um ou mais componentes do vetor velocidade. No caso dos anemômetros de fio quente e Laser-Doppler, as taxas de medição podem atingir faixas de dezenas de kHz, o que possibilita o estudo das flutuações de velocidade características de escoamentos turbulentos

Nas últimas décadas, a evolução da capacidade de processamento e armazenamento dos computadores, aliada à disponibilidade de câmeras digitais de elevada resolução espacial e de fontes de luz laser pulsada de alta energia, viabilizou o uso de técnicas de medição baseadas no processamento digital de imagens de partículas traçadoras distribuídas no fluido. A principal vantagem destas técnicas sobre as técnicas pontuais mencionadas é a capacidade de fornecer medidas do campo instantâneo de velocidade do fluido em regiões extensas do escoamento, as chamadas medidas de campo completo. Devido às baixas taxas de aquisição de imagens das câmeras digitais e de pulsação das fontes lasers disponíveis atualmente, as taxas de medição de velocidade obtidas por estas técnicas esta limitada a cerca de 1 kHz. Espera-se que esta limitação seja contornada com as novas tecnologias de câmeras e fontes laser a serem disponibilizadas no futuro.

Dentre as diversas possibilidades de implementação de técnicas de medição de campos completos de velocidade de fluidos em escoamento, a mais empregada tem sido a técnica conhecida como Velocimetria por Imagem de Partículas, ou PIV do inglês *Particle Image Velocimetry*

No presente trabalho optou-se pela utilização da técnica PIV em sua forma estereoscópica para a determinação do campo de velocidade tri-dimensional em uma seção reta do escoamento através de duto circular com água e agente redutor de atrito. A seguir é apresentada uma breve descrição da técnica PIV empregada.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

3.1
Velocimetria por Imagem de Partículas – PIV

Técnicas de medida pontuais como anemometria de fio e filme quente e anemometria Laser-Doppler têm sido alvos de constantes aperfeiçoamentos nos últimos anos. Estas técnicas são largamente utilizadas oferecendo informações sobre a variação no tempo de várias quantidades de interesse em pontos específicos dos escoamentos. No entanto, o instrumento ideal para o estudo de escoamentos é aquele capaz de medir o campo completo, tridimensional do vetor velocidade, $\vec{u}(t)$, como uma função contínua do espaço em todo o domínio do escoamento, e como uma função contínua do tempo. Os avanços na informática e microeletrônica estão possibilitando o desenvolvimento de sistemas de medição de campos completos.

A técnica de velocimetria por imagem de partícula em sua configuração básica permite a obtenção de campos instantâneos de velocidade em um dado plano do escoamento. O principio básico do PIV é a determinação do deslocamento de partículas traçadoras dispersas no escoamento em um dado intervalo de tempo. Esta técnica usa planos de luz pulsada e equipamentos fotográficos ou eletrônicos para o registro das imagens das partículas traçadoras. É classificada, portanto, como técnica não invasiva (se considerarmos que a adição de partículas traçadoras não perturba o escoamento).

A Figura 3.1 abaixo ilustra os processos envolvidos na implementação da técnica PIV. Como pode ser visto na figura, o feixe pulsado de luz laser é transformado em um plano através do uso de um conjunto de lentes cilíndricas e esféricas. O duplo pulso do laser produz imagens das partículas traçadoras que são capturadas em duas imagens consecutivas na câmera digital, cada uma correspondendo a um pulso do laser. As imagens capturadas são processadas através de um programa de computador que divide a imagem em diversas sub-imagens com forma quadrada, as janelas de correlação, com dimensões no escoamento da ordem de meio a um milímetro de lado. A imagem das partículas de cada janela da primeira imagem é comparada com janelas na segunda imagem através de um algoritmo de correlação cruzada. Os deslocamentos médios das partículas em cada janela são determinados com resolução sub-pixel através de ajustes polinomiais aos picos da função de correlação. Após a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

varredura de toda imagem, o campo de deslocamentos é determinado. Como o tempo entre pulsos de laser é previamente conhecido, determina-se o campo de velocidade instantâneo desejado.

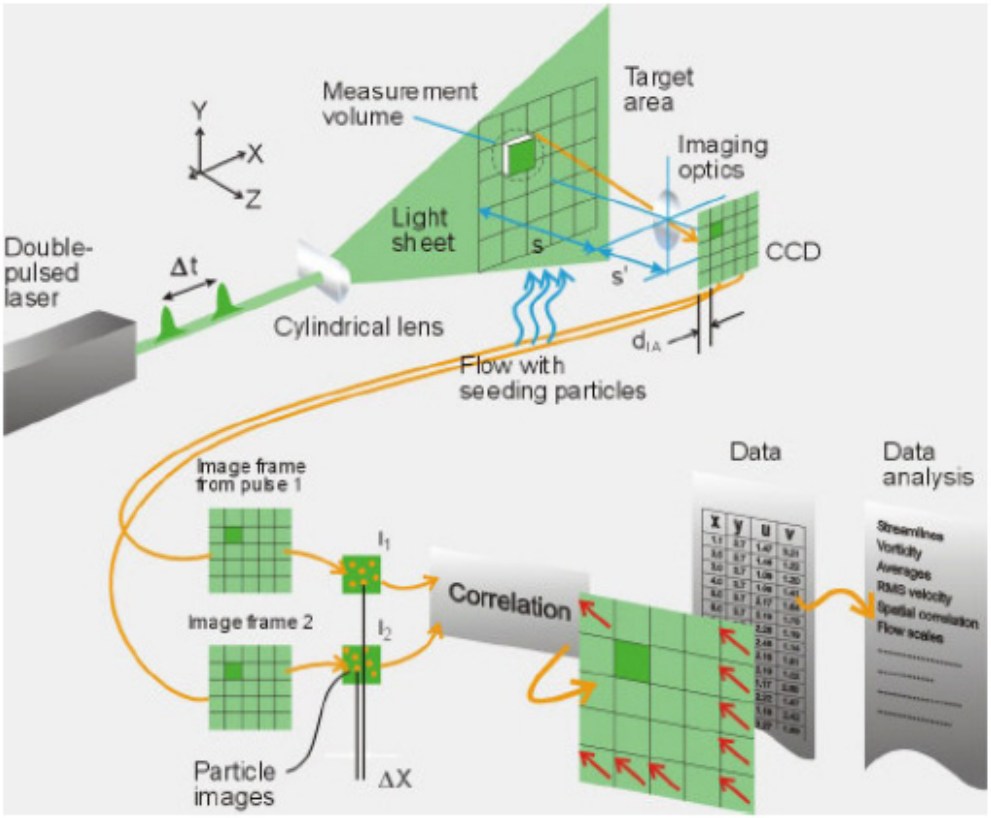


Figura 3.1 – Ilustração da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas. (fonte:http://www.dantecdynamics.com)

Como o conhecimento do funcionamento do PIV já está consolidado e como em outros trabalhos como o de Barros Jr. [2], sua descrição é detalhada, optou-se por uma descrição resumida do seu principio de funcionamento. Van Doorne [15] sugere que uma excelente referência para a técnica pode ser encontrada no livro de Raffel et Al de 2007.

A descrição sucinta apresentada nos parágrafos anteriores corresponde à implementação básica da técnica PIV. Nesta forma de implementação são determinadas as componentes bi-dimensionais do escoamento ao longo plano de iluminação. Para obtermos as três componente do vetor velocidade no plano de iluminação pode-se utilizar a técnica PIV em sua versão estereoscópica que utiliza as imagens simultâneas de duas câmeras direcionadas para o plano de iluminação e formando um ângulo entre si. Esta foi a técnica utilizada no presente trabalho e será descrita na seção seguinte.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

3.1.1
Técnica PIV Estereoscópica

Com o PIV estereoscópico, ou SPIV, podemos medir todas as três componentes (3C) de velocidade do escoamento no plano de laser. O SPIV utiliza duas câmeras que visualizam o escoamento de direções distintas e captam o deslocamento das partículas na direção perpendicular à direção de visualização. Com isso, obtem-se duas projeções da velocidade das partículas, uma para cada câmera, o que permite o cálculo do vetor velocidade em todo o campo conforme a Figura 3.2. As coordenadas utilizadas na figura não coincidem necessariamente com a orientação do plano de laser. Neste exemplo os eixos x e z pertencem ao plano formado pelas duas câmeras e o eixo x divide o ângulo formado pelas duas câmeras em partes iguais. Os eixos y_1 e y_2 das câmeras 1 e 2 respectivamente são escolhidos para serem paralelos ao eixo y do sistema de coordenadas definido anteriormente. Como o deslocamento das partículas é muito menor que a distancia até as câmeras, o vetor tri-dimesnional de deslocamento pode ser aproximado pelas seguintes expressões:

$$\Delta x = \frac{\Delta x_1 - \Delta x_2}{2sen(\alpha)} \tag{5}$$

$$\Delta y = \frac{\Delta y_1 + \Delta y_2}{2} \tag{6}$$

$$\Delta z = \frac{-\Delta x_1 - \Delta x_2}{2\cos(\alpha)} \tag{7}$$

Onde, Δx, Δy e Δz são os componentes do deslocamento real tridimensional de uma dada janela de interrogação determinados pela técnica SPIV, Δx_1, Δy_1 são os deslocamentos nas direções *x* e *y* medidos pela câmera 1, enquanto Δx_2, Δy_2 são os deslocamentos medidos pela câmera 2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

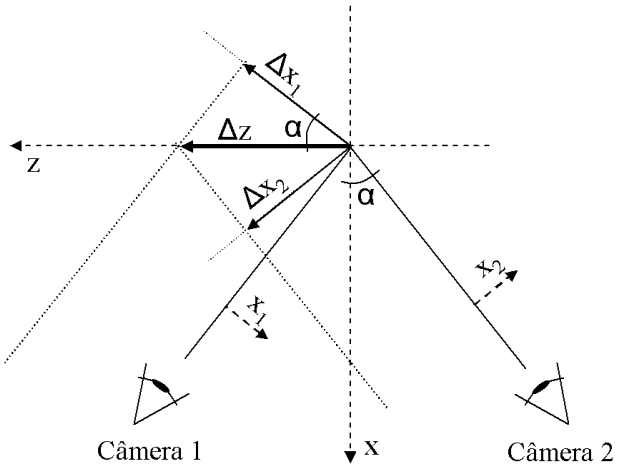


Figura 3.2– SPIV – Cálculo do deslocamento da partícula

Na prática, o campo de vetores é avaliado para cada uma das câmeras utilizando as correlações de um PIV bi-dimensional padrão. Para o cálculo do campo de vetores tri-dimensional, 3C, é necessário que cada campo vetorial bi-dimensional, 2C, seja distorcido do plano da imagem para o plano de medição (plano do laser) e interpolado em um malha comum. Em seguida, os vetores deslocamento obtidos de cada uma das câmeras são combinados para calcular as três componentes do deslocamento das partículas.

Teoricamente a distorção da imagem pode ser baseada no exato conhecimento da geometria da seção de visualização, porém, normalmente é baseado em um processo de calibração. Neste processo um alvo na forma de um disco circular é introduzido dentro do tubo de acrílico onde serão realizadas as medições do escoamento. A Figura 3.3 apresenta a imagem do alvo utilizado nos experimentos. O diâmetro do alvo era bem próximo ao diâmetro interno da tubulação.

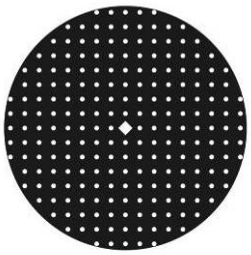


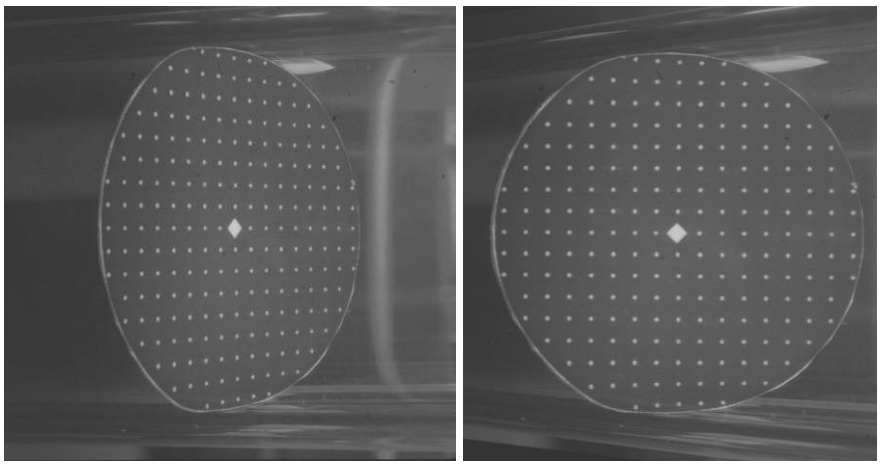
Figura 3.3 – Alvo de calibração utilizado.

A superfície do disco contém uma malha de pontos com distâncias conhecidas. As imagens do alvo obtidas por cada câmera apresentam-se deformadas, como mostrado na Figura 3.4 (a). Uma função polinomial de terceira

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA

ordem é ajustada às coordenadas da imagem original através de um procedimento de mínimos quadrados, correlacionando cada posição na imagem deformada com uma posição correta no alvo. Na Figura 3.4 (b) pode-se verificar o efeito da aplicação do polinômio para a correção da imagem do alvo. Pode-se verificar uma perfeita circularidade do alvo após o processo de distorção. Nota-se, no entanto duas regiões achatadas nas partes superior e inferior da imagem do alvo distorcido. Credita-se este defeito à diferença de índice de refração entra água e o acrílico. A função polinomial obtida pelo processo de calibração é então aplicada aos deslocamentos medidos por cada câmera. No presente trabalho utilizou-se rotinas de calibração desenvolvidas pela TSI Inc. e disponíveis no programa INSIGHT 3G.

Para uma descrição mais detalhada sobre os princípios do PIV e SPIV veja Doorne [15], Barros [2], Raffel et al. [12].



(a) (b)

Figura 3.4 – Imagem do alvo de calibração. (a) imagem original. (b) imagem após o processo de distorção

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0611795/CA