

## VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS

**L.F.A. Azevedo**

Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO

22453-900, Rio de Janeiro RJ

Lfaa@mec.puc-rio.br

**J.A. Almeida**

Fundação Universidade do Rio Grande

96201-900, Rio Grande RS

Jorge@calvin.ocfis.furg.br

### 1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do campo de velocidade de fluidos em movimento é fundamental para o entendimento dos mecanismos básicos que governam a dinâmica do escoamento. O escoamento de fluidos controla diversos processos industriais e naturais que abrangem aplicações como a geração e conversão de energia, aerodinâmica, fenômenos biológicos, meteorológicos, entre outros. Nas últimas décadas a evolução da capacidade de processamento e armazenagem dos computadores viabilizou a solução numérica de escoamentos complexos. De fato, hoje já estão disponíveis códigos computacionais comerciais poderosos, capazes de apresentar soluções para escoamentos transientes, turbulentos em geometrias complexas, envolvendo efeitos combinados de transferência de calor e massa, combustão e radiação. Em áreas onde os métodos computacionais são aplicados em modelos físicos bem estabelecidos com modelos matemáticos bem comportados, o papel dos experimentos de laboratório tem enfraquecido consideravelmente, não sendo mais necessária a comprovação experimental das previsões computacionais. No entanto, existem classes de problemas de natureza não linear e multi-dimensional de considerável interesse científico e industrial para os quais os estudos experimentais são fundamentais para o entendimento dos fenômenos básicos envolvidos e validação de previsão numéricas. Dentre estes problemas, destaca-se o do entendimento e previsão de escoamentos turbulentos, que acredita-se (Gharib, 1996), ainda continuará a ser o grande problema da física não resolvido do próximo século.

A medição de escoamentos multi-dimensionais transientes, como escoamentos turbulentos, tem sido um desafio permanente para os experimentalistas. Técnicas de medida pontuais como anemometria de fio e filme quente e anemometria laser-doppler têm sido alvo 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, tri-dimensional do vetor velocidade,  $\vec{u}(\vec{x}, t)$ , como uma função contínua do espaço em todo o domínio do escoamento, e como uma função contínua do tempo.

As medidas espaciais e temporais obtidas com este instrumento possibilitam o cálculo direto de quantidades fundamentais para a mecânica dos fluidos como campo de vorticidade, tensor deformação e até gradientes de pressão. É interessante notar que estas

quantidades aparecem explicitamente na equação de Navier-Stokes e têm sido avaliadas até então com as técnicas convencionais de medidas pontuais.

Os mesmos avanços na informática e microeletrônica que impulsionaram o desenvolvimento das soluções numéricas de escoamentos, estão possibilitando o desenvolvimento de sistemas de medição de campos completos, como os descritos no parágrafo anterior. Câmaras de vídeo de alta resolução, alta capacidade de armazenamento e processamento digital de imagens a um custo acessível tornaram viável a transformação da visualização de escoamentos de uma técnica qualitativa para uma técnica quantitativa, com nível de exatidão comparável às técnicas de medição pontuais existentes.

Um estudo da literatura sobre as técnicas de medição de campos completos de velocidade apresenta um número crescente de trabalhos enfocando diferentes concepções de sistemas e técnicas para análise das imagens do escoamento. Excelentes trabalhos de revisão da literatura estão disponíveis, apresentando tanto aspectos teóricos quanto práticos de diferentes técnicas ( por exemplo, Raffel et al, 1998). Na última década empresas tradicionais, fabricantes de equipamentos para medição de escoamentos, como anemômetros de fio quente e laser-Doppler, passaram a comercializar sistemas sofisticados de alto desempenho para medição de campos completos de velocidade. Estes sistemas, ainda com custos elevados, resultam de associações com os principais pesquisadores acadêmicos da área, incorporando o que há mais atual na área.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para a difusão de técnicas de medição de escoamentos de campos completos no País, apresentando alguns aspectos de uma das técnicas mais difundidas para medição de escoamentos instantâneos em regiões extensas do escoamento.: a velocimetria por imagem de partículas. Mesmo para a técnica de velocimetria por imagem de partículas existe uma grande variedade de implementações em uso em diferentes laboratórios, aplicadas a problemas específicos. Espera-se que o leitor deste texto possa obter uma noção das potencialidades e limitações da técnica e encontrar a forma de implementação mais adequada para a sua aplicação particular nas referências citadas.

## **2. VELOCIMETRIA DE LUZ PULSADA**

A grande maioria dos esforços realizados no sentido de desenvolver sistemas para a medição simultânea de um grande número de vetores velocidade em domínios bi-dimensionais e tri-dimensionais, tem sido concentrados em técnicas óticas. Estas técnicas usam planos de luz pulsada e equipamentos fotográficos ou eletrônicos para o registro das imagens de partículas traçadoras distribuídas no fluido. São classificadas, portanto, como técnicas não invasivas (se considerarmos que a adição de partículas traçadoras não perturba o escoamento), de medição indireta do escoamento, pois medem o deslocamento de partículas traçadoras que supostamente acompanham fielmente o escoamento.

Vários nomes têm sido atribuídos aos diferentes sistemas concebidos: Velocimetria de speckles de laser, Velocimetria por imagem de partículas, Velocimetria por deslocamento de imagem de partículas, e Velocimetria por acompanhamento de partículas. Como sugerido por Adrian (1991), todas estas técnicas podem ser consideradas como casos especiais de uma técnica de medição chamada Velocimetria de Luz Pulsada.

Esta técnica consiste em uma fonte de luz pulsada que ilumina por curtos intervalos de tempo pequenas partículas traçadoras distribuídas no fluido, como mostra esquematicamente a Fig. 1.

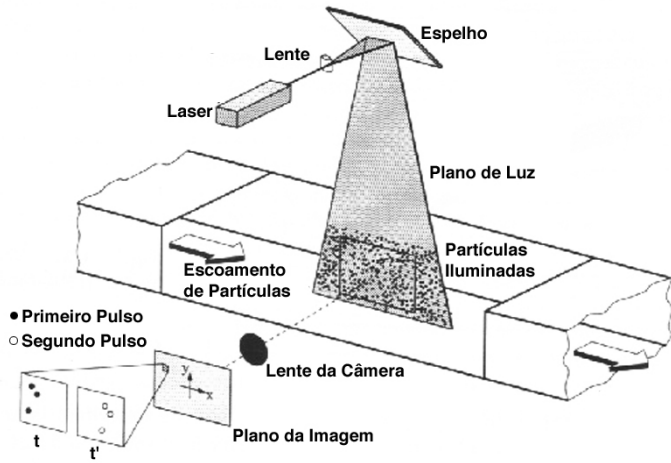


Figura 1. Sistema de velocimetria por luz pulsada (Raffel, 1998).

Um meio de gravação de imagens armazena as informações das localizações das partículas em dois instantes de tempo correspondentes aos instantes de iluminação. As velocidades dos traçadores são obtidas de seus deslocamentos registrados,  $\Delta\vec{x}(\vec{x}, t)$ , e do intervalo de exposição utilizado,  $\Delta t$ . Assim,

$$\Delta\vec{u} = \frac{\Delta\vec{x}(\vec{x}, t)}{\Delta t} \quad (1)$$

As partículas traçadoras são usualmente sólidos em meios gasosos ou líquidos, podendo também ser bolhas de gases em meios líquidos, gotículas de líquido em meios gasosos ou líquido imiscível.

As fontes de iluminação podem ser fontes de luz incoerente, como lâmpadas de flash ou estroboscópicas, ou fontes de luz coerente como um feixe modulado no tempo de um laser contínuo de neon ou argônio, ou lasers pulsados de rubi, vapor de cobre ou Nd:YAG. Lasers são normalmente preferidos pelo alto grau de colimação da luz, alta energia e curta duração dos pulsos produzidos.

A região iluminada pode ser um volume do escoamento no caso de medidas tri-dimensionais, ou uma região plana no caso de medidas bi-dimensionais, como na Fig. 1.

O registro das imagens das partículas pode ser feito em filme fotográfico, matrizes de detectores eletrônicos de vídeo ou filme holográfico.

## 2.1. Descrição geral da técnica

A técnica de velocimetria de luz pulsada em sua versão bi-dimensional pode ser melhor descrita com auxílio da Fig. 2, baseada no trabalho de Adrian (1996).

Na figura, partículas traçadoras contidas no plano de iluminação pulsado de espessura  $\Delta Z_0$  são focalizadas no plano da imagem, onde se localiza o meio de registro (filme ou câmara de vídeo). A lente posicionada a  $90^\circ$  com o escoamento produz uma ampliação,  $M = d_i/d_o$ , tipicamente na faixa  $0,1 < M < 10$ . As dimensões mais usuais do plano de luz são da ordem  $1 \times 100$  mm (espessura  $\times$  altura), podendo atingir valores de alturas de planos da ordem de 1 metro em aplicações especiais.

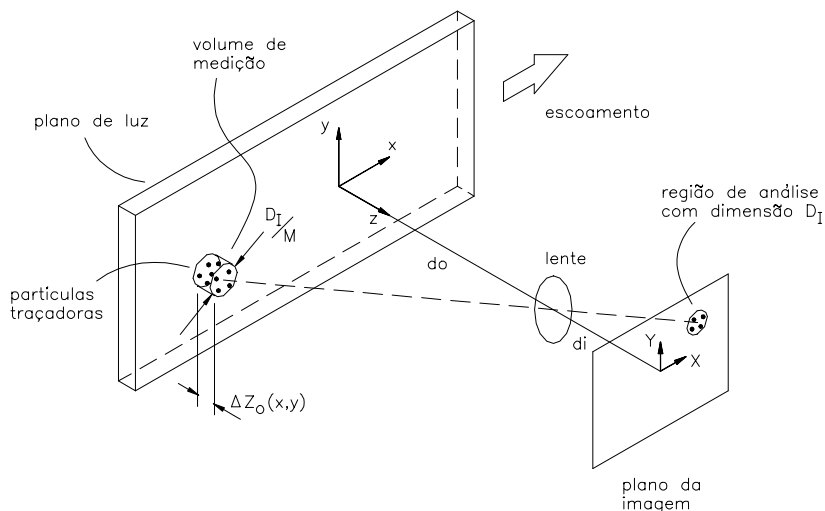


Figura 2 . Plano de iluminação e plano da imagem.

As imagens de dupla exposição formadas são transferidas para um computador onde são analisadas para obtenção das informações desejadas. A análise das imagens registradas constitui-se em uma das mais importantes etapas do processo de medida. Dela depende a exatidão, confiabilidade e resolução espacial obtidas.

A análise das imagens das partículas traçadoras pode ser feita manualmente se o número de imagens de partículas é pequeno. Este método, utilizado no passado, além de consumir um grande número de horas de trabalho, produzia resolução espacial não satisfatória. A automação do processo de análise das imagens proporcionou um salto significativo na resolução espacial que pode ser obtida na medição do campo de velocidade. Mesmo assim, a análise de imagens é uma tarefa que consome um tempo considerável de processamento. Por exemplo, uma resolução típica de uma câmara de vídeo comum é da ordem de  $1000 \times 1000$  elementos de imagem, isto é,  $1 \times 10^6$  pixels. Imagens destas dimensões podem ser diretamente digitalizadas e passadas ao computador para análise. Quando se utiliza um filme fotográfico de alta resolução (cerca de 300 linhas por milímetro) em formato de  $100 \times 125$  mm o número de elementos de imagem chega a  $1,1 \times 10^9$  pixels.

Apesar de ainda oferecerem maior resolução espacial, filmes fotográficos estão rapidamente cedendo espaço para câmaras digitais devido à maior conveniência de não requererem revelação química e produzirem resultados de escoamento quase em tempo

real. Hoje, resultados obtidos com as melhores câmaras digitais já apresentam resolução espacial comparável, ou até mesmo superior, àquelas obtidas com filmes no formato 35 mm.

## **2.2. Modos de operação da técnica de velocimetria de luz pulsada**

As características da imagem registrada dependem fortemente da concentração das partículas traçadoras,  $C$  (número de partículas por unidade de volume). A concentração de partículas determina o tipo de imagem produzida e, conseqüentemente, o método de análise de imagem a ser utilizado.

Adotando-se a nomenclatura proposta por Adrian (1991), podemos classificar os modos de operação dos sistemas de velocimetria de luz pulsada em: Velocimetria por *speckles* de laser, Velocimetria por acompanhamento de partículas e Velocimetria de alta densidade de imagem de partículas.

### **2.2.1. Velocimetria por *speckle* de laser**

Para elevadas concentrações de partículas, as imagens das partículas se sobrepõem no plano da imagem. Caso a luz espalhada pelas partículas seja coerente, as imagens sobrepostas interferirão formando padrões de interferência aleatórios que se movem com o escoamento. Estes padrões de interferência são conhecidos na literatura como *speckles*. São comuns na área de mecânica dos sólidos quando superfícies sólidas em movimento são iluminadas por luz coerente. A rugosidade natural das superfícies, atua como pontos de espalhamento de luz produzindo os padrões de interferência, isto é, os *speckles*. Como os padrões de *speckles* estão associados a grupos de partículas, a medida do deslocamento dos *speckles* fornece a velocidade do grupo de partículas traçadoras.

Quando operado com este elevado valor de concentração de partículas o sistema de medição é denominado Velocimetria por *speckles* de Laser. Os primeiros experimentos desta técnica em escoamento de fluido foram realizados por Dudderar e Simpkins(1978), e aperfeiçoados por Meynart (1980).

A análise de uma imagem de *speckles* de dupla exposição não pode ser feita manualmente, pois o olho humano não é capaz de separar os campos superpostos de *speckles*. A análise é feita pelo método das franjas de Young (Bursh and Tokarski, 1968), onde um feixe de luz coerente é passado através da imagem de dupla exposição abrangendo uma pequena sub-região da imagem. A luz difratada pelos padrões de *speckles* forma franjas de interferência. A orientação e espaçamento das franjas revela as informações sobre a direção e magnitude dos deslocamentos naquele ponto. Varrendo-se toda a imagem com o feixe de laser, obtém-se o campo completo do escoamento.

### **2.2.2. Velocimetria por acompanhamento de partículas**

Para baixas concentrações de partículas a superposição de imagens tem baixa probabilidade de ocorrência. Desta forma, a imagem registrada corresponde àquela das partículas individuais. Caso a concentração de partículas seja suficientemente baixa, é possível realizar análises nas imagens de múltiplas exposições, seguindo individualmente cada partícula e determinando o campo de deslocamentos. Devido à baixa concentração de

partículas, a resolução espacial do campo de velocidade obtido com esta técnica não é elevada.

A velocimetria por acompanhamento de partículas deriva dos experimentos de visualização de escoamento que utilizavam fotografias estroboscópicas ou fotografia de trajetória de partículas. O livro de Van Dyke(1982) apresenta alguns exemplos destes experimentos. Por décadas, análises quantitativas manuais destas fotografias produziram informações sobre os campos de velocidade. A automação da análise destas imagens por meio do uso de técnicas digitais deu novo impulso à velocimetria por acompanhamento de partículas.

### **2.2.3. Velocimetria de alta densidade de imagens de partículas**

Quando a concentração das partículas traçadoras situa-se em um valor abaixo daquele necessário para produzir *speckles*, mas significativamente acima dos valores que permitem o acompanhamento individual de partículas, o sistema de velocimetria por luz pulsada opera no modo de alta densidade de partículas, conhecido também como Velocimetria por Imagem de Partículas, ou pela sigla PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*. Nestas condições, o número elevado de partículas obriga a uma análise estatística do movimento de grupos de partículas entre duas exposições da fonte de iluminação.

Pickering e Halliwell (1984) e Adrian (1984) demonstraram que na maioria das aplicações relevantes em mecânica dos fluidos os níveis de concentração de partículas que podem ser alcançados não são suficientes para produzir *speckles*. Desta forma a velocimetria por imagem de partículas de alta concentração é a técnica mais adequada de ser utilizada.

No presente trabalho, este é a modo de operação enfocado

## **3. VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS - PIV**

O presente trabalho enfoca a técnica de medição de velocimetria por luz pulsada operando no modo de alta densidade de partículas, PIV. Esta é atualmente a técnica mais utilizada nos laboratórios de pesquisa, sendo a base dos sistemas comerciais disponíveis. Mesmo para esta técnica em particular, existe na literatura uma grande variedade de implementações distintas que incluem diferentes modo de iluminação, equipamentos para captura de imagem e, principalmente, algoritmos para análise das imagens e extração do campo de velocidade. A seguir são apresentados alguns aspectos a serem considerados na implementação de um sistema baseado na técnica PIV.

Os principais elementos que compõem a técnica de Velocimetria por Imagem de partículas – PIV são o fluido, as partículas traçadoras, o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens e o sistema de processamento das imagens para a extração do campo de velocidade desejado.

### **3.1. O fluido**

A principal restrição ao fluido utilizado é que o mesmo deve ser transparente ao comprimento de onda da luz empregada. Esta, talvez, seja uma das maiores restrições da técnica PIV, e de outras técnicas óticas como anemometria laser-Doppler.

Idealmente, a massa específica do fluido utilizado deve ser a mesma das partículas traçadoras para garantir que as partículas acompanhem fielmente o movimento do fluido. A utilização de um líquido como fluido de trabalho facilita a seleção das partículas a serem utilizadas, pois vários materiais disponíveis para produção de partículas apresentam valores de massa específica próximos ao de líquidos. No estudo de escoamento de gases, a diferença de massa específica em relação aos materiais das partículas traçadoras obriga a utilização de partículas de dimensões reduzidas para garantir o acompanhamento do movimento do fluido. Como será comentado adiante, partículas pequenas dificultam o registro da imagem, obrigando a utilização de fontes de luz de alta energia e câmaras sensíveis, aumentando o custo do sistema de medição. Os fluidos mais amplamente utilizados nos experimentos com a técnica PIV são o ar, a água e alguns óleos e polímeros transparentes. É recomendável, sempre que possível, que o fluido de trabalho seja devidamente filtrado para a eliminação de partículas estranhas antes da inclusão das partículas traçadoras. Este procedimento facilita a etapa da análise digital das imagens para determinação do deslocamento das partículas.

### 3.2. As partículas

As partículas traçadoras desempenham um papel fundamental no sistema de medição, pois elas são responsáveis pelo espalhamento da luz, devendo produzir imagens de boa qualidade e seguir de maneira fiel o escoamento. A seguir são apresentadas algumas considerações sobre a concentração e tamanho das partículas, bem como sua capacidade de seguir o escoamento.

#### 3.2.1. Concentração das partículas no fluido

As partículas dispersas no escoamento não devem perturbar o campo de velocidade. Como o campo de velocidades na região próxima a cada partícula é inevitavelmente afetado, as partículas devem ser suficientemente pequenas e estar suficientemente dispersas para minimizar o efeito de sua presença. Portanto, as partículas devem apresentar baixa concentração em volume, além de possuírem pequeno diâmetro.

Por outro lado, a concentração deve ser suficientemente grande para que o campo de velocidade possa ser completamente reconstituído. Para uma distribuição uniforme das medidas, é suficiente satisfazer o critério de Nyquist (Erbeck, 1985), segundo o qual a frequência de medidas,  $\omega_N$ , deve ser pelo menos igual ao dobro da frequência espacial máxima encontrada no campo de velocidade,  $\omega_{\text{máx}}$ , isto é,  $\omega_N > 2 \omega_{\text{máx}}$ .

O diâmetro da imagem de uma partícula,  $d_e$ , é determinado pelo diâmetro da partícula,  $d_p$ , pela ampliação da imagem e pela resposta da lente que focaliza a imagem da partícula. Para uma lente limitada por difração, a resposta pontual tem diâmetro,  $d_s$ , dado por (Adrian, 1991),

$$d_s = 2.44(1 + M)f^{\#}\lambda \quad (2)$$

onde  $f^{\#}$  é o número  $f$  da lente (sua abertura),  $M$  é a ampliação da imagem e  $\lambda$  é o comprimento de onda da luz. A imagem de uma partícula de diâmetro finito é uma combinação da resposta da lente com a imagem geométrica da partícula (Goodman, 1968).

Adrian e Yao (1985) propuseram uma expressão aproximada para o diâmetro da imagem da partícula,  $d_e$

$$d_e = \left( M^2 d_p^2 + d_s^2 \right)^{1/2} \quad (3)$$

Para valores típicos destes parâmetros, tal como  $M = 1$ ,  $f^\# = 8$  e  $\lambda = 514$  nm, resulta  $d_s = 20,06$   $\mu\text{m}$ , de modo que  $d_e$  é aproximadamente independente do tamanho da partícula para partículas com diâmetro inferior a 10  $\mu\text{m}$ . Pela mesma razão, quando o diâmetro da partícula for maior do que 50  $\mu\text{m}$ , o diâmetro na imagem será essencialmente  $M.d_p$ .

As equações (2) e (3) são válidas para partículas que estejam dentro da profundidade de campo da lente, dada por:

$$\delta z = 4 \left( 1 + M^{-1} \right)^2 f^{\#2} \lambda \quad (4)$$

A profundidade de campo coloca uma forte restrição no sistema de aquisição das imagens. Por exemplo, a profundidade de campo para  $f^\# = 8$  e  $\lambda = 514$  nm, é de apenas 0,526 mm. Portanto, se procuramos imagens de partículas pequenas com grande resolução espacial, a profundidade de campo será naturalmente pequena, e será adequado utilizar um plano de luz com pequena espessura para iluminar somente as partículas localizadas dentro da região na qual as partículas estão em foco. Se a espessura do plano de luz for maior do que a profundidade de campo, as partículas dentro do plano de luz e fora da profundidade de campo aparecerão fora de foco na imagem, isto é, borradas, e portanto causando prejuízo a qualidade da imagem. Um valor típico da profundidade de campo é da ordem de 1 mm.

Uma relação entre a concentração das partículas,  $C$ , a espessura do plano de luz,  $\Delta z_o$ , e o tamanho da região analisada é fornecida pela equação (5), onde  $N_I$  é chamada densidade da imagem, e representa o número médio de partículas dentro de qualquer região com tamanho igual ao da região base. O tamanho da região base, também chamada região analisada, é definido como a interseção do plano de luz com um círculo de diâmetro  $d_I/M$

$$N_I = C \Delta z_o \frac{\pi d_I^2}{4M^2} \quad (5)$$

onde  $\frac{\pi d_I^2}{4M^2}$ , é a área da região analisada. Para a situação em que a região base é quadrada,

modifica-se a equação (5) para:

$$N_I = C \Delta z_o \frac{(\Delta x_{\max})^2}{M^2} \quad (6)$$

onde  $\Delta x_{\max}$ , é o lado da região base.



O número de partículas dispersas no fluido é determinado pelo quociente entre o volume de partículas adicionado ao fluido e o volume de uma partícula.

$$\text{Número de Partículas} = \text{Volume de partículas} / (\pi \cdot d^3 / 6) \quad (7)$$

O volume de partículas é obtido pelo quociente entre a massa de partículas adicionada ao fluido e a massa específica das partículas, e a concentração,  $C$ , é obtida pelo quociente entre o número de partículas adicionadas ao fluido e o volume de fluido utilizado na seção de testes. Segundo Adrian (1991), o desempenho da técnica de medição de velocidade através da imagem das partículas é otimizada para  $N_f > 10-20$ .

### 3.2.2. Acompanhamento do fluido

Na técnica de velocimetria por imagem de partículas as velocidades realmente medidas são as velocidades das partículas. Portanto, é necessário conhecer-se como o movimento das partículas está relacionado com o fluido ao seu redor

Uma partícula em suspensão em um escoamento uni-direcional com gradiente de velocidade transversal à direção do escoamento está sujeita a uma força de sustentação que atua na direção transversal ao escoamento tendendo a desviar a partícula da linha de corrente (força de sustentação de Safman, Soo, 1967). Para uma partícula esférica esta força é dada por:

$$F_s = c_f \frac{d_p^2}{4} \rho_f (u_f - u_p) \sqrt{v_f \frac{\partial u_f}{\partial y}} \quad (8)$$

onde  $F_s$  é a força de sustentação,  $c_f$  uma constante,  $d_p$  o diâmetro da partícula,  $\rho_f$  a massa específica do fluido,  $u_f$  a velocidade do fluido,  $u_p$  a velocidade da partícula,  $v_f$  a viscosidade cinemática do fluido e  $y$  é a direção normal ao escoamento.

Observando-se a equação (8), fica claro que o diâmetro da partícula deve ser pequeno para que o desvio seja aceitável.

Deve-se também considerar a diferença entre a massa específica do fluido e a massa específica das partículas em suspensão. Se esta diferença existir, a força de empuxo não será igual à força gravitacional, e em um escoamento uniforme as partículas atingirão uma velocidade terminal relativa ao fluido quando ocorrer um equilíbrio entre a força de empuxo, a força gravitacional e a força de arraste. Para partículas de pequeno diâmetro, onde o número de Reynolds seja suficientemente pequeno, a força de arraste pode ser aproximada pela lei de Stokes, sendo a velocidade terminal em relação ao fluido, na direção da força gravitacional, expressa por:

$$V_t = \frac{1}{18} g \frac{(\rho_p - \rho_f)}{\mu_f} d_p^2 \quad (9)$$

onde,  $V_t$  é a velocidade terminal da partícula,  $g$  o módulo da aceleração da gravidade,  $\rho_p$  é a massa específica da partícula,  $\mu_f$  a viscosidade dinâmica do fluido e  $d_p$  o diâmetro da partícula.

Outro fato a considerar é que a inércia da partícula impede que a mesma acompanhe variações abruptas da velocidade do fluido ao seu redor. Soo (1967) apresenta um desenvolvimento para as equações que descrevem o escoamento bi-fásico fluido/partícula para um escoamento turbulento de fluido compressível e Newtoniano. A partir das equações obtidas conclui-se que, para partículas com massa específica aproximadamente igual à do fluido, a velocidade da partícula será aproximadamente igual a velocidade do fluido ao seu redor, para qualquer instante, se o número de Stokes for menor que 1, como mostra a equação (10),

$$S = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{\nu_f}{\omega}} < 1 \quad (10)$$

onde  $S$  é o número de Stokes,  $\nu_f$  a viscosidade cinemática do fluido,  $d_p$  o diâmetro da partícula e  $\omega$  a frequência temporal de flutuação da velocidade. A frequência máxima à qual a partícula responderá pode ser estimada tomando-se  $S = 1$ . Assim,

$$\omega_{\max} = \frac{\nu_f}{d_p^2} \quad (11)$$

Nota-se que quanto menor o diâmetro da partícula, maior o espectro de frequências a que ela pode responder. Entretanto, Adrian e Yao (1985) mostraram que existe um tamanho ótimo para as partículas, devido ao fato que a potência luminosa necessária para obter a imagem aumenta quando o tamanho da partícula diminui, e o tamanho da imagem da partícula diminui quando o tamanho da partícula diminui. Adrian e Yao (1985) obtiveram como valor ótimo para o diâmetro das partículas  $d_p \approx 10 \mu\text{m}$ , para partículas de poliestireno em água e  $d_p \approx 5 \mu\text{m}$  para partículas de óleo ou vidro no ar.

Para partículas com  $10 \mu\text{m}$  de diâmetro tem-se  $\omega_{\max} = 10^4 \text{ Hz}$ . Quando comparamos este valor com a resposta de frequência de um anemômetro de fio quente de temperatura constante, observa-se que os dois valores são da mesma ordem de grandeza

### 3.2.3. Espalhamento da luz pelas partículas

A qualidade das imagens obtidas na técnica PIV é de fundamental importância para o sucesso do processo de análise de imagens onde os deslocamentos das partículas entre dois instante de tempo são medidos. O bom contraste de uma imagem de partículas depende do poder de espalhamento da luz incidente pelas partículas. Normalmente, é mais eficiente e econômico trabalhar no sentido de melhorar o poder de espalhamento das partículas traçadoras do que aumentar a potência da luz incidente utilizando-se uma fonte de iluminação mais potente. De uma maneira geral, pode-se dizer que a luz espalhada por pequenas partículas é função da razão entre o índice de refração da partícula e do fluido, do tamanho da partícula, de sua forma e orientação. Além disso, a luz espalhada depende da polarização e do ângulo de observação. Para partículas esféricas com diâmetros maiores que o comprimento de onda da luz incidente, a teoria de espalhamento de Mie fornece uma indicação da distribuição e intensidade da luz espalhada em torno de uma partícula (Raffel, 1998). A teoria de Mie indica que partículas maiores espalham mais luz e que o

espalhamento não é uniformemente distribuído em todas as direções. A maior intensidade de luz espalhada se dá na direção oposta à direção da luz incidente. Na direção ortogonal à direção da luz incidente, onde normalmente se posicionam as câmaras para registro de imagens na técnica PIV, a intensidade da luz espalhada é bastante reduzida.

Como pode ser observado, a escolha das partículas envolve a conciliação de dois fatores opostos: o diâmetro das partículas deve ser o menor possível para que ela acompanhe o escoamento e grande o suficiente para que espalhe a luz necessária para sensibilizar o meio escolhido para o registro da imagem.

A teoria de Mie mostra que a eficiência de espalhamento de luz por uma partícula depende fortemente da razão entre os índices de refração da partícula e do fluido. Assim, como o índice de refração da água é significativamente maior que o do ar, o espalhamento de luz por partículas de mesmo material e diâmetro é pelo menos uma ordem de grandeza maior no ar do que na água. Assim, partículas com maior diâmetro são necessárias em experimentos na água. Este requisito pode ser facilmente contornável pois é relativamente fácil obter partículas com massa específica próxima à da água.

A literatura referente à técnica de anemometria laser-Doppler é uma boa fonte de referência no que diz respeito à partículas para medição de escoamentos (Adrian, 1996). As tabelas 1 e 2 apresentam alguns materiais usados como traçadores para experimentos em líquidos e ar. No caso de experimentos com ar a grandes vazões, o suprimento de partículas na concentração e uniformidade necessárias para garantir boas medições pode ser uma tarefa difícil. Geradores de aerossol com múltiplos pontos de injeção são normalmente necessários.

Tabela 1. Partículas traçadoras para escoamento de líquido (Raffel, 1998).

Tipo	Material	Diâmetro médio, $\mu\text{m}$
Sólido	Poliestireno	10-100
	Alumínio	2-7
	Esferas de vidro	10-100
Líquido	Diferentes óleos	50-500
Gas	Bolhas de oxigênio	50-1000

Tabela 2. Partículas traçadoras para escoamento de gás (Raffel, 1998).

Tipo	Material	Diâmetro médio, $\mu\text{m}$
Sólido	Poliestireno	0,5-10
	Alumínio	2-7
	Esferas ocas de vidro	30-100
Fumaça	Diferentes materiais	>1
Líquido	Aerossol de óleos	0,5-10

### 3.3. Iluminação do Escoamento

A finalidade do sistema de iluminação é fornecer ao sistema de medição de velocidades o veículo de transporte de informação - a luz - e restringir a região do

escoamento estudada, impedindo que regiões fora da profundidade de campo do sistema ótico sejam iluminadas. O sistema de iluminação deve também ser adequado ao sistema de registro de imagem utilizado, fornecendo luz em intensidade e faixa espectral de comprimentos de onda compatíveis com o meio de registro disponível.

### 3.3.1. Lasers

Lasers têm sido amplamente utilizados em sistemas PIV. Isto se deve à capacidade de emissão de luz monocromática, com alta densidade de energia que pode ser facilmente pulsada e configurada na forma de planos de luz de dimensões variadas. Os lasers mais comumente utilizados têm sido os de Hélio-Neônio (He-Ne), Íon de Argônio (Ar<sup>+</sup>), e Neodímio-YAG (Nd-YAG).

O laser He-Ne é um laser a gás de emissão contínua no comprimento de onda de 633 nm. Normalmente de baixa potência, tem sido mais utilizado na análises óticas de imagens fotográficas de PIV e não como fonte de iluminação do escoamento.

O laser Ar<sup>+</sup> é um laser a gás emitindo continuamente nos comprimentos de onda principais de 514 nm e 488 nm, podendo atingir potências da ordem de dezenas de Watts. Por ser a fonte laser comumente utilizada em anemômetros laser-Doppler, o laser de Ar<sup>+</sup> migrou para as aplicações de PIV. Como toda fonte contínua de luz, é necessário um sistema de modulação para a produção dos pulsos de iluminação para o registro de duas imagens consecutivas. Assim, a energia efetivamente presente em cada pulso não é elevada, o que limita a aplicação do laser Ar<sup>+</sup> a escoamentos de líquido (onde partículas maiores podem ser usadas) com níveis de velocidade não muito elevados (tipicamente 5 m/s).

O laser Nd-YAG é o mais importante laser de estado sólido para aplicações de PIV. Este laser produz feixes de alta energia no comprimento de onda de 1064 nm, que é drobado em frequência com cristais especiais produzindo um feixe visível com comprimento de onda de 532 nm. Polarizadores e células de Pockels são normalmente introduzidas na cavidade para aumentar a energia de cada pulso produzido (Q-switching), possibilitando também que o disparo do feixe seja controlado externamente em sincronismo com o sistema de aquisição de imagens. A taxa de repetição de pulsos alcançada com estes lasers é da ordem de 10-15 Hz, o que impediria a medição de escoamentos rápidos. Para contornar esta limitação, dois lasers são normalmente utilizados operando em sincronismo, permitindo assim a realização de intervalos mínimos entre pulsos, o que possibilita a medição de escoamentos de gases de altos números de Mach. A tabela 3 apresenta uma comparação entre as características de alguns lasers usados em PIV.

Tabela 3. Comparação entre características de lasers para aplicação de PIV (TSI, 1997).

Laser	Duração do Pulso, $\mu$ s	Separação do pulso, $\mu$ s	Energia por pulso, mJ	Taxa de Repetição, 1/s
Ar <sup>+</sup>	50	500	0,1-1	2000
Nd-YAG	0,01	0,2	50-400	10
Vapor de Cobre	0,025	1	1000	0,01
Rubi	0,01	50	5	20000

Apesar de lasers serem as fontes preferidas e mais versáteis para medições utilizando a técnica PIV, fontes produzindo planos de luz branca podem também ser utilizadas. A

qualidade dos planos de luz formados não é comparável com aquela obtida com fontes lasers. Por outro lado, filmes fotográficos e sensores eletrônicos de câmaras CCD, são bastante sensíveis a fontes de luz branca como lâmpadas de Xenônio. Arranjos com duas lâmpadas de *flash* sincronizadas podem ser usados para produzir pequenos intervalos entre pulsos de iluminação. De uma maneira geral, o uso de fontes de luz branca apresenta vantagens com relação ao custo, mas está limitado a aplicações em escoamentos de líquidos a baixas velocidades.

### 3.3.2. Sistema óptico para formação do plano de luz

O plano de luz necessário para iluminar a região de interesse do escoamento deve produzir um feixe plano de pequena espessura e altura adequada às dimensões da região de observação. A espessura da região iluminada deve ser menor que a profundidade de campo esperada para o experimento (ver equação (4)), para impedir o aparecimento de imagens de partículas fora de foco. A altura do plano de luz determina a intensidade de iluminação no plano, devendo ser da ordem da região a ser estudada para otimizar a energia luminosa disponível.

O plano de luz a partir de um feixe laser é formado normalmente utilizando-se uma lente cilíndrica e uma lente esférica, como mostra esquematicamente a Figura 3. A lente cilíndrica diverge o plano em uma direção, enquanto a lente esférica tem a finalidade de reduzir a espessura do plano na região de observação.

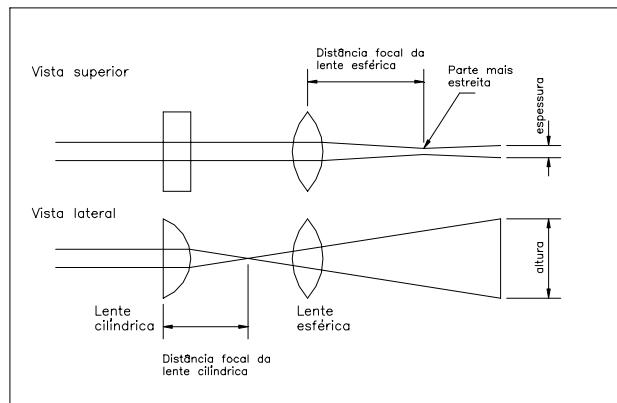


Figura 3. Lentes para formação do plano de luz (Almeida, 1997).

Adrian (1991) desenvolveu uma expressão útil para determinar a potência de luz necessária em um plano de iluminação para sensibilizar um filme,

$$P = \frac{c}{ISO} \cdot e \cdot h \cdot \frac{f^{\#}}{\Delta t_e} \quad (12)$$

onde,  $P$  é a potência luminosa total do feixe,  $e$  é a espessura do plano de luz,  $h$  sua altura,  $f^\#$  a abertura da lente,  $\Delta t_e$  o tempo de exposição das partículas,  $ISO$  representa a sensibilidade do filme fotográfico e  $c$  é uma constante que engloba as características de espalhamento de luz das partículas e de transmissão das lentes da câmara. O valor desta constante deve ser obtido a partir de experimentos de calibração.

A equação (12) mostra que para escoamentos de alta velocidade, onde o tempo de exposição deve ser suficientemente pequeno para *congelar* a imagem das partículas, a potência de iluminação deve ser elevada. Mostra também a dependência direta da potência de iluminação com a altura e espessura do plano de luz.

### 3.4. Registro das imagens

Historicamente, o registro das imagens de partículas iluminadas pelos pulsos de luz na técnica PIV foi primeiro realizado utilizando câmaras fotográficas com filmes químicos, seguido de um processo de revelação e digitalização das imagens para posterior processamento (Adrian, 1991). Ainda hoje filmes fotográficos são utilizados em experimentos que exigem alta resolução espacial e faixa dinâmica de velocidade (razão entre a maior e menor velocidade detectável).

Os avanços recentes verificados na área de equipamentos para aquisição eletrônica de imagens proporcionam uma alternativa interessante aos registros fotográficos com filmes para aplicações de PIV. A possibilidade de observação da imagem quase em tempo real e eliminação dos processos químicos de revelação de filmes são vantagens consideráveis. As atuais tendências de desenvolvimento dos sensores eletrônicos de imagem sugerem que em futuro próximo os métodos baseados em filmes fotográficos deverão ser completamente abandonados. Por esta razão, no presente trabalho daremos ênfase à descrição de sensores eletrônicos.

Existe uma grande variedade de sensores eletrônicos de imagem. Dentre estes, o mais utilizado é o sensor CCD (charged coupled device). De uma maneira geral o CCD é um sensor eletrônico que converte luz, isto é, ftons, em carga elétrica. Normalmente, quando nos referimos a um sensor CCD, temos em mente uma matriz destes sensores. Cada elemento individual da matriz é chamado de pixel, do inglês, *picture element*. Suas dimensões típicas são da ordem de  $10 \times 10 \mu\text{m}$ , ou 100 pixels por milímetro.

Como será comentado mais adiante, existem diferentes maneiras de implementação da técnica PIV que repercutirão na forma de análise das imagens de dupla exposição das partículas traçadoras.

Em um dos modos de operação, historicamente o primeiro a ser implementado, dois pulsos consecutivos de luz são disparados sobre uma mesmo quadro da câmara. Assim, no caso de uso de filme fotográfico, as duas imagens de partículas correspondendo aos dois instantes consecutivos são gravadas sobre o mesmo negativo. Esta técnica, chamada de duplo pulso/quadro único, pode também ser utilizada com sensores eletrônicos desde que os intervalos entre os dois pulsos de luz sejam inferiores ao tempo de exposição da imagem para a câmara específica em uso.

A técnica de duplo pulso/quadro único é utilizada em conjunto com câmaras fotográficas pois, normalmente, o tempo de avanço do filme em câmaras motorizadas é muito elevado não permitindo, a não ser para escoamentos muito lentos, que a imagem gerada por cada pulso de luz seja registrada em quadros subseqüentes. No caso de escoamento de alta velocidade, a técnica de duplo pulso/quadro único é utilizada, pois

mesmo câmaras eletrônicas não são ainda capazes de expor campos subsequentes nos curtos tempos exigidos.

A maior deficiência do método de duplo pulso/quadro único é sua incapacidade de determinar o sentido do escoamento, uma vez que torna-se impossível distinguir-se em uma mesma imagem qual partícula está associada ao primeiro pulso de luz e qual está associada ao segundo pulso. Este problema é contornado com a utilização de deslocadores de imagens (*image shifting*). Raffel et al (1998) apresentam uma boa discussão sobre a técnica de deslocamento de imagens e dos equipamentos utilizados para sua implementação. Na sua versão mais comum, os equipamentos para deslocamento de imagens são espelhos girantes através dos quais as imagens do escoamento são refletidas na câmara para registro. Assim, através de um sistema eletrônico de sincronização, o primeiro pulso de luz é registrado pela câmara. Antes do segundo pulso ser disparado o espelho desloca-se angularmente. O segundo pulso é então disparado e a imagem registrada possui um deslocamento conhecido, imposto pelo sistema, que se soma ao deslocamento imposto pelo campo de velocidade. Este deslocamento imposto deve ser maior que o maior deslocamento negativo esperado para o campo de velocidade em estudo. Após o processamento das imagens para determinação do deslocamento das partículas, o deslocamento imposto é subtraído de todo o campo de deslocamentos, revelando o sentido dos deslocamentos.

O modo alternativo de registro das imagens é o pulso único/quadro duplo, onde cada imagem de partículas correspondendo a um pulso de luz é gravado em um quadro distinto. Para a utilização deste modo de operação em escoamentos com velocidades elevadas, é necessário que a câmara seja capaz de atualizar o registro da imagem rapidamente. A grande vantagem deste modo de operação em relação ao anterior é que a ambigüidade no sentido do escoamento é automaticamente resolvida, pois sabe-se que a imagem gravada no primeiro quadro corresponde ao primeiro pulso de luz e que a imagem do segundo quadro corresponde ao segundo pulso. O avanço na velocidade de atualização dos campos das novas câmaras, aliado a técnicas de sincronismo, têm permitido a utilização desta técnica para escoamentos com velocidades da ordem de 1000 m/s. Espera-se que no futuro a técnica de pulso único/duplo quadro venha a ser dominante.

Os diversos tipos de câmaras digitais disponíveis diferem no arranjo geométrico dos sensores CCD e na maneira como as cargas acumuladas em cada sensor são transferidas para os registros de leitura (Raffel et al, 1998).

Um tipo de arranjo que tem sido bastante utilizado na aquisição de imagens em sistemas PIV é representado na Figura 4. Este arranjo é utilizado na câmara TSI-PIVCAM 40-30 fabricado pela TSI Inc. Nesta câmara os tempos de exposição de cada quadro são da ordem de 33 ms, um valor elevado para aplicações de velocidades médias e altas. O tempo de transferência das imagens entre quadros é, no entanto, da ordem de 20  $\mu$ s. Através de um sistema eletrônico de sincronização o disparo do primeiro pulso de laser é ajustado para acontecer imediatamente antes do fim do período de exposição do primeiro quadro. O segundo disparo do laser acontece imediatamente após o início da exposição do segundo quadro. Desta forma, a partir de uma câmara convencional com tempo exposição longo de 33 ms obtém-se dois registros consecutivos de imagens com intervalo de apenas 20  $\mu$ s. Este intervalo é suficiente para registrar escoamentos de elevada velocidade. Câmaras com tempos entre exposições da ordem de 1-5  $\mu$ s estão já disponíveis no mercado, o que permite a medição de escoamentos de gases com elevado números de Mach. (TSI Inc, 1997).

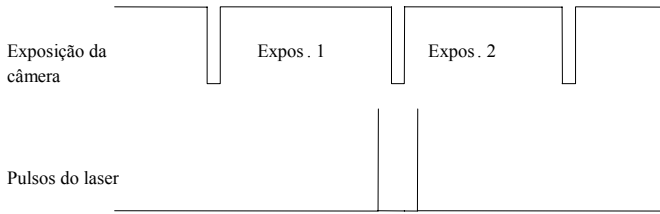


Figura 4. Diagrama de exposição da câmara sincronizada TSI PIVCAM 4-30.

#### 4. MÉTODOS DE ANÁLISE DAS IMAGENS

Uma vez que as imagens das partículas traçadoras correspondentes aos dois pulsos de luz tenham sido registradas, o próximo passo é proceder a análise destas imagens com o objetivo de extrair as informações sobre os deslocamentos das partículas e o campo de velocidade desejado. No caso da técnica PIV, a densidade de partículas na imagem é elevada, não permitindo que o deslocamento individual de cada partícula seja determinado.

A alternativa disponível é estudar-se o deslocamento de pequenas regiões na imagem contendo cerca de uma dezena de partículas e assumir-se que, devido às pequenas dimensões desta região, não há gradientes apreciáveis de velocidade e que as partículas ali contidas deslocam-se preservando suas distâncias relativas entre os dois instantes de tempo considerados. Esta técnica aplica-se a escoamentos predominantemente bi-dimensionais, tendo a direção principal do escoamento alinhada com o plano de luz. Técnicas para a determinação de campos de velocidade tri-dimensionais em regiões bi-dimensionais do espaço já estão disponíveis (Raffel et al, 1998) e não serão abordadas no presente trabalho.

##### 4.1. Método da correlação cruzada de imagens

O método da correlação cruzada das imagens é empregado para determinar o campo de velocidades quando dispõe-se de duas imagens sucessivas do escoamento. Isto é obtido empregando-se o modo de operação pulso único/duplo quadro mencionado anteriormente.

A aplicação do algoritmo de correlação cruzada normalizada bi-dimensional, permite determinar o módulo, a direção e também o sentido de cada vetor que compõe o campo de velocidade medido. (Englart et al, 1989 e Willer et al, 1991). Para tal são necessárias duas imagens, uma obtida no instante  $t$  (Imagem 1) e outra em  $t+\Delta t$  (Imagem 2). Uma região contendo o ponto no qual desejamos determinar a velocidade é selecionada na Imagem 1, e então a mesma configuração das partículas é procurada na imagem 2, como mostra a Figura 5.



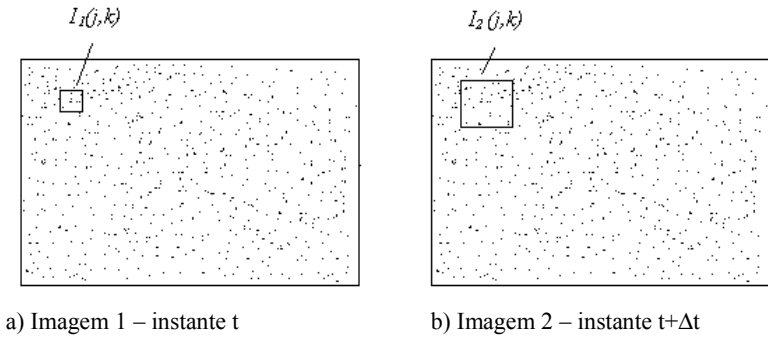


Figura 5. Imagem das partículas em dois instantes de tempo (Almeida, 1997).

A região indicada por  $I_1(j,k)$ , na Figura 5, é chamada de região base, e a região indicada por  $I_2(j,k)$  esta localizada dentro de uma região  $I_B(j,k)$  chamada de região de busca. Naturalmente, a região de busca deve ser maior do que a região base, e a escolha do tamanho de cada região depende do escoamento, como descrito nos próximos parágrafos. A correlação espacial das imagens está baseada no fato de que as partículas dentro da região investigada têm a mesma velocidade e mantêm a mesma posição relativa, portanto o intervalo de tempo  $\Delta t$  entre as duas imagens é limitado para que não ocorram deformações significativas na posição relativa das partículas. Isto estabelece um compromisso entre a velocidade e o intervalo de tempo entre duas imagens sucessivas.

O algoritmo utilizado para a correlação cruzada normalizada das imagens é definido por (Englart et al, 1989),

$$R(m,n) = \frac{\sum_j \sum_k I_1(j,k) I_2(j-m, k-n)}{\left\{ \left[ \sum_j \sum_k I_1^2(j,k) \right] \left[ \sum_j \sum_k I_2^2(j-m, k-n) \right] \right\}^{1/2}} \quad (13)$$

onde  $I_1(j,k)$  e  $I_2(j,k)$  são duas sub-imagens dentro das imagens 1 e 2 e  $(j,k)$  são índices em uma base  $J \times K$  pixels que está localizada dentro de uma região de busca com  $M \times N$  pixels. A base é obtida de uma região na imagem 1 com coordenadas do ponto central  $(x_1, y_1)$ , e contém um padrão distinto de partículas. A região de busca na imagem 2 também tem coordenadas do ponto central  $(x_1, y_1)$ . Utilizando o algoritmo de correlação cruzada (equação 13), o padrão da imagem 1 é sobreposto em todas as posições possíveis dentro da imagem 2, e o ponto central da base na posição que apresenta o maior coeficiente de correlação  $R$ , possui coordenadas  $(x_2, y_2)$  que descrevem o deslocamento do padrão, como ilustra a Figura 6. O vetor velocidade é a linha que une o centro da região de busca ao centro da região base na posição onde ocorre o maior valor do coeficiente de correlação  $R$ .

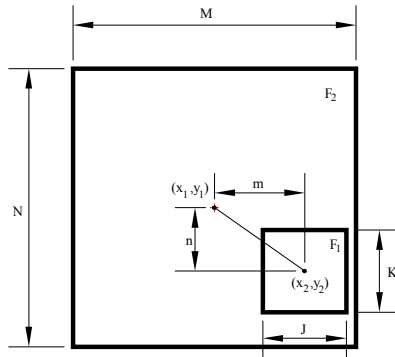


Figura 6. Região base na posição de maior correlação (Almeida, 1997).

Os componentes da velocidade são calculados por,

$$u = FS \frac{x_2 - x_1}{\Delta t} \quad (14)$$

$$v = FS \frac{y_2 - y_1}{\Delta t} \quad (15)$$

o que permite determinar o módulo, a direção e o sentido de cada vetor velocidade. Nas equações acima,  $FS$  é uma fator de escala que relaciona a dimensão na imagem com uma dimensão real no escoamento.

Como a função de correlação é normalizada, o coeficiente de correlação  $R$ , varia entre 0 e 1 ( $0 \leq R \leq 1$ ). Portanto, quando o padrão da região base for localizado na região de busca, o coeficiente de correlação será  $R=1$ . Entretanto, devido às possíveis deformações que o padrão pode sofrer em razão das características do escoamento, em alguns casos encontraremos valores máximos de  $R < 1$ . Faz-se portanto necessário estabelecer um valor de  $R$  acima do qual a deformação do padrão é aceitável e abaixo do qual considera-se que a correlação não é boa o suficiente para determinar a velocidade com a exatidão desejada.

Um mapa dos coeficientes de correlação para uma situação típica, é apresentado na Figura 7, onde as coordenadas do centro da região base, são  $(x_1=0, y_1=0)$  e as coordenadas  $(x_2, y_2)$  correspondem ao ponto onde  $R$  é máximo, isto é, ao pico mais elevado da Figura 7.

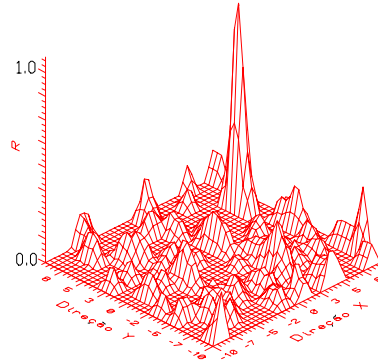


Figura 7. Mapa do coeficiente de correlação, R, para correlação cruzada (Almeida, 1997).

#### 4.2. Método da auto correlação de imagens

O método de auto correlação de imagens é empregado em sistemas PIV quando obtêm-se imagens de dupla exposição na mesma imagem, isto é, o modo de duplo pulso/quadro único mencionado anteriormente.

O algoritmo empregado no cálculo do coeficiente de correlação é o mesmo apresentado pela equação (13) exceto que, agora,  $I_1(j,k) = I_2(j,k)$  e a equação é escrita como,

$$R(m,n) = \frac{\sum_j \sum_k I_1(j,k) I_1(j-m, k-n)}{\left\{ \left[ \sum_j \sum_k I_1^2(j,k) \right] \left[ \sum_j \sum_k I_1^2(j-m, k-n) \right] \right\}^{1/2}} \quad (16)$$

onde  $m$  varia de  $-J$  a  $J$  e  $n$  varia de  $-K$  a  $K$ , para que a imagem  $I_1(j,k)$  possa ser sobreposta a ela mesmo em todas as posições possíveis.

Um mapa dos coeficientes de correlação  $R$ , para uma imagem de dupla exposição de uma região de um escoamento é mostrado na Figura 8. Observa-se na Figura 8, que existe um máximo central que corresponde a sobreposição da imagem com si própria, e dois máximos locais simétricos a este máximo local que correspondem a sobreposição das partículas da segunda exposição com as partículas da primeira exposição e vice-versa.

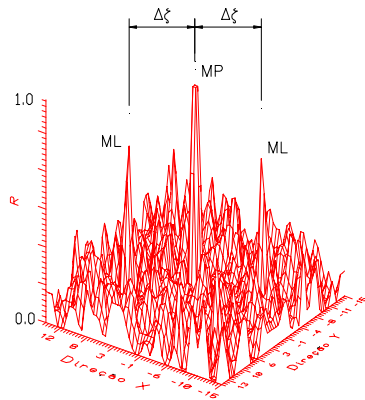


Figura 8. Mapa do coeficiente de correlação,  $R$ , para auto correlação (Almeida, 1997).

As coordenadas do máximo central (MP) são  $(x_1 = 0, y_1 = 0)$ , e as coordenadas de um dos máximos locais (ML) são  $(x_2, y_2)$ , a velocidade é calculada por:

$$u = FS \frac{|x_2 - x_1|}{\Delta t} \quad (17)$$

$$v = FS \frac{|y_2 - y_1|}{\Delta t} \quad (18)$$

Para as coordenadas  $(x_2, y_2)$  nas equações 7 e 8, pode-se utilizar qualquer um dos máximos locais (ML), pois os mesmos são simétricos, e as diferenças  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são tomadas em módulo. FS é um fator de escala que relaciona a dimensão na imagem com a dimensão no escoamento.

O método da auto correlação permite determinar o módulo e a direção da velocidade, mas não permite determinar o sentido diretamente. Para determinar o sentido é necessário empregar o artifício de obter a imagem através da reflexão em um espelho girante, como mencionado anteriormente.

Os métodos de auto correlação e correlação cruzada apresentados são baseados na convolução de imagens, de acordo com as equações 13 e 16. Estes cálculos requerem esforços computacionais significativos. Uma alternativa mais eficiente utilizada é avaliar as funções de correlação usando transformadas rápidas de Fourier bi-dimensionais (FFT). Neste método a FFT da região 1 é multiplicada pelo conjugado complexo da FFT da região 2. A transformada inversa de Fourier do produto é a função de correlação procurada (Raffel et al, 1998)

### 4.3. Métodos para detecção dos picos de correlação

Os métodos de correlação cruzada ou auto correlação utilizam a posição do ponto de maior valor da função de correlação como indicação da localização do deslocamento das partículas. Como as imagens de origem que são analisadas são discretas, a localização das coordenadas dos picos de correlação é realizada como uma resolução da ordem de 1 pixel, o que limita a incerteza da técnica de medição. Alguns métodos foram propostos para diminuir a incerteza da localização dos picos para frações de pixel. Estes métodos são baseados no ajuste de funções de interpolação aos picos de correlação e posterior busca dos pontos de máximo com resolução sub-pixel. Os métodos utilizados com sucesso são baseados em ajustes parabólicos ou Gaussiano. Raffel et al (1998). apresentam uma revisão destes métodos, indicando que incertezas da ordem de 1/20 de pixel podem ser obtidas na localização dos picos de correlação e, portanto, na velocidade medida.

### 4.4. Pós-processamento dos dados

A principal vantagem do método PIV sobre técnicas convencionais de medição de escoamentos é a possibilidade de determinação de campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento. A medição destes campos instantâneos permite que quantidades integrais ou derivadas de interesse sejam calculadas. Dentre esta, destaca-se campos instantâneos de vorticidade, taxa de deformação, circulação e fluxos de massa.

Após uma análise automática das imagens com as técnicas descritas anteriormente, uma quantidade significativa de vetores velocidade fica disponível para análise. Se a técnica PIV é bem aplicada, apenas uma pequena fração dos vetores calculados são errados. Uma inspeção visual do mapa de vetores indica claramente vetores em erro. Estes vetores devem ser descartados para evitar que o cálculo das quantidades derivadas e integrais seja contaminada por estes vetores espúrios.

Várias técnicas foram propostas para remover os vetores errados. Em sua maioria as técnicas de remoção são baseadas na comparação de vetores com seus vizinhos e aplicação critérios de desvio máximo. Alguns métodos baseiam-se na verificação da conservação de massa em células vizinhas aos vetores testados (Raffel et al, 1998).

Após identificados, os vetores errados são removidos e devem ser substituídos por vetores interpolados para que não haja vazios no campo de velocidade medido. Estes vazios provocam problemas graves no cálculo posterior das quantidades derivadas, como a vorticidade.

## 5. EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO DA TÉCNICA PIV

Nesta seção são apresentados resultados de um experimento realizados utilizando a técnica de velocimetria por imagem de partículas, PIV, que foi brevemente descrita neste trabalho. Este experimento foi montado com o intuito de comparar os resultados medidos com o sistema PIV montado e resultados teóricos. O escoamento escolhido foi a rotação de corpo rígido de um fluido no interior de um tanque fechado, cilíndrico de vidro. A partir do conhecimento da rotação do cilindro e da posição radial obtém-se a velocidade teórica do ponto como sendo o produto da rotação pelo raio.

Água foi o fluido de trabalho e utilizou-se partículas ocas de vidro recobertas com uma camada metálica, com diâmetro aproximado de 30  $\mu\text{m}$ . A Fig. 9 apresenta o experimento

construído. O laser utilizado foi  $\text{Ar}^+$  com 5W de potência, modulado por uma célula de Pockels. A câmara utilizada era o modelo PIVCAM 4-30 descrito anteriormente. O processamento foi realizado por correlação cruzada de imagens (Gomes et al, 2000).

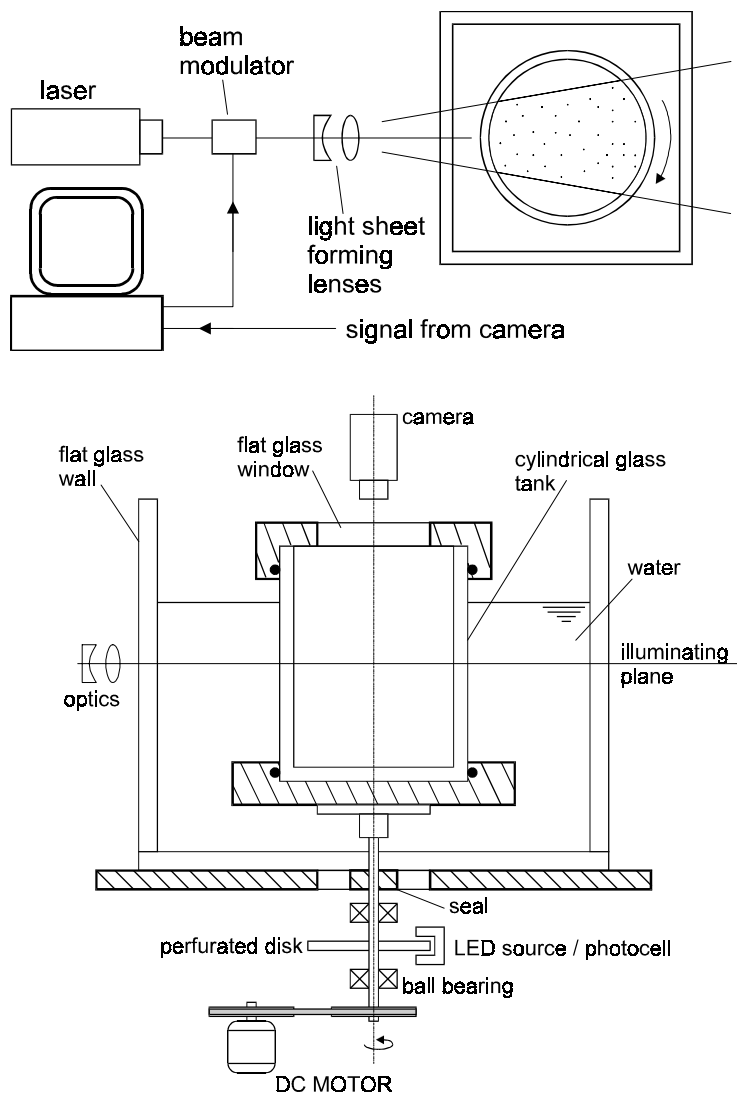


Figura 9. Experimento de rotação de corpo rígido (Gomes et al, 2000).

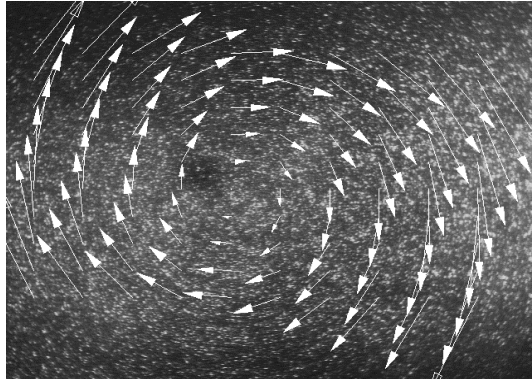


Figura 10. Imagem das partículas e campo de velocidade para experimento de rotação de corpo rígido com velocidade angular de 222 RPM (Gomes et al, 2000).

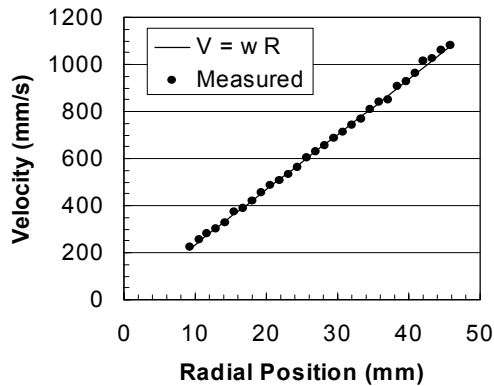


Figura 11. Comparação entre resultados medidos e calculados para 222RPM (Gomes et al, 2000).

As Figuras 10 e 11 apresentam resultados típicos obtidos. Na Fig. 10 a imagem do campo de velocidade é superposta à imagem das partículas em rotação. Na Fig. 11 as velocidades medidas ao longo de um raio são comparadas com a velocidade teórica. O desvio máximo obtido entre experimentos e teoria foi de 0,9%.

## 6. COMENTÁRIOS FINAIS

O presente trabalho descreveu de maneira sucinta alguns aspectos da técnica de velocimetria por imagem de partículas, PIV, utilizada na medição de campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento. O objetivo do trabalho foi apresentar

uma introdução à técnica e motivar o leitor interessado a aprofundar-se no assunto através da literatura citada.

A técnica PIV está hoje bem estabelecida, tendo sido incorporada aos laboratórios de pesquisa como uma ferramenta fundamental de trabalho, complementar a outras técnicas pontuais como anemometria de fio quente e laser-Doppler.

Existem inúmeras variações na implementação da técnica PIV que envolvem diferentes equipamentos e métodos de análise de imagens. Sistemas para a medição de campos tri-dimensionais de velocidade em regiões planares do escoamento estão sendo cada vez mais utilizados e já estão disponíveis comercialmente. Também, técnicas de processamento de altíssima resolução espacial têm produzido informações sobre escoamentos nunca antes disponíveis (Hart,1999). As técnicas holográficas para medição de campos tri-dimensionais em regiões tri-dimensionais do escoamento estão em uso em alguns laboratórios de pesquisa, não sendo ainda comercializadas.

Espera-se que a evolução dos equipamentos para registro e processamento de imagens, cada vez mais rápidos e de custo menor, tornem os sistemas de velocimetria por imagem de partículas ferramentas de uso comum nos laboratórios acadêmicos e industriais, promovendo uma revolução na medição de escoamentos similar àquela que vem ocorrendo na área de simulação numérica de escoamentos como decorrência do desenvolvimento e barateamento dos computadores.

## 7. REFERÊNCIAS

- Adrian, R.J., 1984, "Scattering Particle Characteristics and their Effects on Pulsed Laser Measurement of Fluid Flow: Speckle Velocimetry vs Particle Image Velocimetry", *Applied Optics*, vol.23(11), pp.1690.
- Adrian,R.J. and Yao, C.S., 1985, "Pulsed Laser Technique Application to Liquid and Gaseous Flows and Scattering Power of Seeding Materials", *Applied Optics*, vol.24, pp.44-52.
- Adrian, R.J., 1991,"Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics", *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 23, pp, 261-304.
- Adrian, R.J., 1996, "Fluid Mechanics Measurements", ed. R.J. Goldstein, Taylor and Francis, Washington.
- Almeida, J.A., 1997, "Sistemas de Velocimetria por Imagem de Partículas", Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio.
- Bursch, J.M. and Tokarski, J.M.J., 1968, "Production of Multiple Beam Fringes from Photographic Scatterers", *Optica Acta*, vol. 15, no.2, pp. 101-111.
- Englart, S.E., Sheng, Z. and Kirlin, R.L., 1989, "Crosscorrelation of Synthetized Digital Image Pairs for Detrmination of Velcoity Vectors Fields Associated with Fluid Flow About a Cylinder", *Flow Visualizatiom – ASME Winter Annual Meeting*, pp.3.
- Erbeck, R., 1985, "Fast Image Processing with a Microcomputer Applied to Speckle Potography", *Applied Optics*,vol.24(22), pp.3838
- Gharib, M., 1996, "Perspective: The Experimentalist and the Problem of Turbulence in the Age of Supercomputer", *ASME Journal of Fluids Engineering*, vol. 118, pp.233-242.
- Goodman, J.W., 1968, *Introduction to Fourier Optics*, McGraw Hill, New York
- Gomes, B.A.A., Thompson, R.L. and Azevedo, L.F.A., 2000,"Solid-body Rotation Flow for Particle Image Velocimetry Calibration", VIII Congresso de Engenharia e Ciência Térmica – ENCIT, Porto Alegre, CD-ROM



- Hart, D.P., 1999, "Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation", Journal of Visualization, The Visualization Society of Japan, Vol. 10.
- Meynart, R., 1980, "Equal Velocity Fringes in a Rayleigh-Bénard Flow by a Speckle Method", Applied Optics, vol.19(9), pp.1385.
- Pickering, C.J.D. and Halliwell, N.A., 1984, "Laser Speckle Photography and Particle Image Velocimetry: Photographic Film Noise", Applied Optics, vol.23(17),pp.2961.
- Raffel, M., Willert, C. and Kompenhans, J., 1998, "Particle Image Velocimetry – A Practical Guide", Springer-Verlag, Berlin.
- Simpkins, P.G. and Dudderar, T.D., 1978, "Laser Speckle Measurements of Transient Bénard Convection", Journal of Fluid Mechanics, vol. 89(4), pp.665.
- Soo, S.L., 1967, "Fluid Dynamics of Multiphase Systems", Blaisdel Publishing Company.
- TSI Inc., 1997, "Notes from Short Course on Flow Diagnostics", Minneapolis
- VanDyke, M., 1980, "An Album of Fluid Motion", Parabolic Press, Stanford.
- Willert, C.E. and Gharib, M., 1991, "Digital Particle Image Velocimetry", Experiments in Fluids, vol.3, pp.181-193