

3

Velocimetria por imagem de partículas - PIV

Neste capítulo será apresentada uma breve descrição dos princípios de funcionamento da técnica de medição utilizada no presente trabalho denominada Velocimetria por Imagem de Partículas, conhecida pela sigla PIV, do inglês *Particle Image Velocimetry*. Esta técnica é baseada no processamento digital de imagens de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido e iluminadas por plano de luz laser pulsado. A técnica PIV vem experimentando um desenvolvimento acentuado nos últimos anos, acompanhando o desenvolvimento das tecnologias de câmera digitais, fontes de luz laser pulsadas, e da capacidade de processamento dos computadores. Trata-se de uma técnica não intrusiva que fornece campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento, uma vantagem significativa em relação às técnicas clássicas como anemometria de fio/filme quente ou anemometria laser Doppler, que fornecem medidas pontuais. A medição de campos instantâneos de velocidade permite a determinação de grandezas relevantes, como correlações espaciais e derivadas espaciais do campo de velocidade. O leitor interessado pode consultar, por exemplo, o trabalho de Raffel et al. [21] onde uma descrição completa da técnica é apresentada.

3.1.

Princípio geral de funcionamento da técnica PIV

A técnica PIV para a medição de campos instantâneos de velocidade baseia-se na determinação do campo de deslocamento de partículas traçadoras previamente distribuídas no fluido em um dado intervalo de tempo. O tempo para a avaliação do deslocamento das partículas deve ser pequeno quando comparado às menores escalas de tempo características do escoamento, de modo que o campo de deslocamento medido possa ser considerado como sendo instantâneo. O campo de velocidade é obtido da razão entre o deslocamento e o tempo, como indicado na equação abaixo,

$$velocidade = \frac{deslocamento}{tempo} \quad (3-1)$$

O princípio geral de funcionamento da técnica PIV pode ser melhor compreendido com o auxílio da Figura 3.1, reproduzida da referência [21]. Na figura, de forma esquemática, é apresentado um escoamento de fluido contendo partículas traçadoras através de um duto de seção reta retangular. Um plano de luz é formado a partir de um feixe proveniente de uma fonte laser pulsada. Um conjunto de lentes é usado na formação do plano a partir do feixe do laser. O plano de luz incide sobre uma seção do escoamento iluminando as partículas traçadoras presentes na região do plano iluminado.

Uma câmera fotográfica é posicionada ortogonalmente ao plano de iluminação. A captura das imagens das partículas é sincronizada com os pulsos do laser, cujo intervalo de tempo é conhecido e precisamente determinado pelo equipamento eletrônico que controla a fonte laser. Desta forma, obtém-se duas imagens consecutivas das partículas passando no plano iluminado. Tipicamente, utilizam-se ampliações, M , das imagens capturadas na faixa de 0,1 a 10, dependendo da aplicação em questão.

As velocidades das partículas traçadoras são então obtidas a partir de seus deslocamentos medidos nas imagens capturadas e do intervalo entre pulsos utilizado. Assim, as componentes da velocidade são determinadas por:

$$u = \frac{(\Delta X/M)}{\Delta t} \quad (3-2)$$

$$v = \frac{(\Delta Y/M)}{\Delta t} \quad (3-3)$$

onde, M é a ampliação da imagem, ΔX e ΔY são as componentes do deslocamento medidos nas duas direções do plano, enquanto u e v são as componentes da velocidade nestas direções.

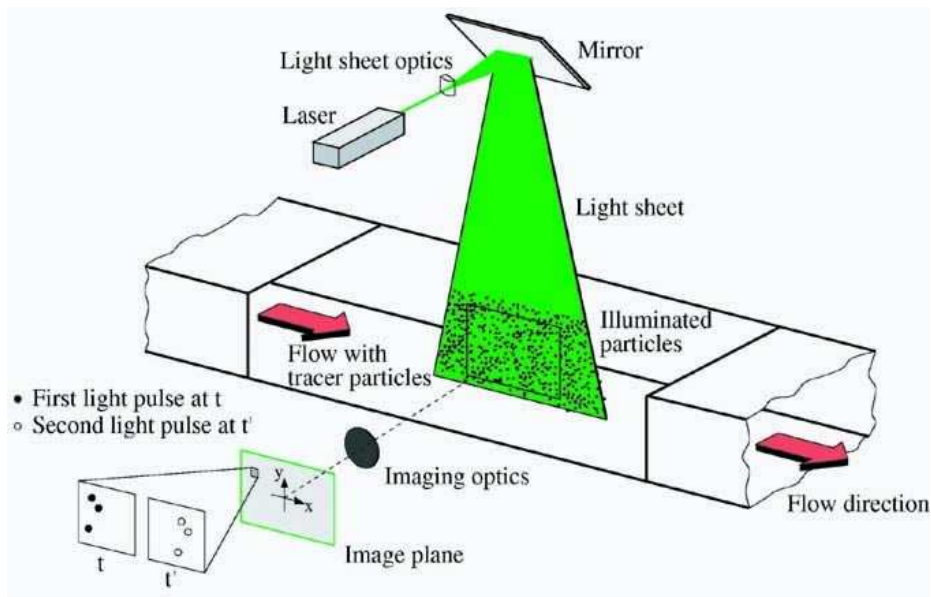


Figura 3.1 - Ilustração da técnica de Velocimetria por Imagem de Partículas [21].

Nas próximas seções serão apresentadas algumas características dos principais componentes da técnica *PIV*, quais sejam as partículas traçadoras, a iluminação, o registro das imagens e a análise das imagens via técnicas estatísticas de processamento digital.

3.1.1. Partículas traçadoras

A técnica *PIV* é uma técnica indireta de medição, uma vez que determina a velocidade das partículas traçadoras e não a do fluido. Portanto, as propriedades fluido-mecânicas das partículas devem ser selecionadas cuidadosamente a fim de evitar discrepâncias significativas entre o movimento do fluido e o das partículas traçadoras.

A escolha das partículas traçadoras deve satisfazer a dois requisitos antagônicos. Do ponto de vista do acompanhamento do escoamento, elas devem ser pequenas e possuir massa específica semelhante à do fluido. Por outro lado, as partículas devem ser grandes o suficiente, e apresentar índice de refração distinto daquele do fluido, de modo a que espalhem a luz incidente de maneira a permitir o registro de suas imagens pela câmera fotográfica.

Segundo Prasad (2000) [18], a condição de acompanhamento do escoamento pelas partículas pode ser avaliada pela velocidade de

sedimentação, V_{sp} , da partícula sob a ação da gravidade em um fluido estagnado:

$$V_{sp} = \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad (3-4)$$

onde, ρ_f é a massa específica do fluido, ρ_p a massa específica das partículas traçadoras, g é a aceleração da gravidade, μ é a viscosidade dinâmica do fluido e d_p é o diâmetro da partícula.

Assim, partículas com V_{sp} desprezíveis em relação à velocidade do escoamento podem ser utilizadas com garantia que seguirão fielmente o escoamento.

Para os líquidos, normalmente, utiliza-se partículas de vidro ôcas ou de poliestireno com diâmetro das partículas entre 10 e 20 μm . Nos escoamentos de gases as partículas devem ser significativamente menores para acompanhar o escoamento, uma vez que há uma grande diferença entre a massa específica dos gases e dos materiais das partículas. Normalmente nos estudos com gases utilizam-se partículas na forma de pequenas gotículas de líquido com diâmetro na faixa de 1 a 5 μm . A maior diferença verificada entre os índices de refração de gases e das gotículas de líquido usadas como traçadores favorece o registro das imagens destas partículas mesmo para estas pequenas dimensões.

O diâmetro da imagem de uma partícula traçadora capturada no sensor da câmera, d_t , é determinado pelo diâmetro da partícula, d_p , pela ampliação da imagem utilizada e por efeitos de difração da luz em torno da partícula que são controlados pela abertura da lente que focaliza a imagem da partícula e pelo comprimento de onda da luz utilizada. A seguinte expressão determina o diâmetro da partícula na imagem d_t . [22]

$$d_t = (M^2 d_p^2 + d_{diff}^2)^{1/2} \quad (3-5)$$

onde,

$$d_{diff} = 2,44(1 + M) f^\# \lambda \quad (3-6)$$

onde d_{diff} é o diâmetro efetivo da imagem de uma partícula, $f^\#$ é a razão entre a distância focal da lente e o diâmetro da abertura da lente por onde a luz penetra, M é a ampliação da imagem e λ é o comprimento de onda da luz do laser.

Outro parâmetro importante na formação da imagem das partículas traçadoras é a espessura, δz , da região onde a imagem das partículas encontra-se em foco, a chamada *profundidade de foco*, dada pela equação (3-7). Em geral

espera-se que a profundidade de foco seja maior que a espessura do plano laser, o que evita a obtenção de imagens de partículas que estejam fora de foco.

$$\delta_z = 2 f^{\#} d_{diff} (M + 1) / M^2 \quad (3-7)$$

A adequada escolha das partículas traçadoras para um dado escoamento a ser estudado é fator determinante no sucesso da aplicação da técnica PIV. Todo o esforço deve ser realizado para que as imagens das partículas sejam capturadas com bom contraste e foco. Técnicas de processamento digital de imagens estão disponíveis e podem ser usadas para melhorar a qualidade das imagens capturadas, mas nada substitui uma boa imagem original. Segundo Adrian [3], para que se tenha boa densidade e homogeneidade de partículas nas imagens para PIV, comumente são misturados entre 10^{10} a 10^{12} partículas por metro cúbico de fluido.

3.1.2. Iluminação por Laser

Em princípio, qualquer fonte de luz planar poderia ser usada como fonte de iluminação para a técnica PIV. No entanto, lasers são utilizados na maioria esmagadora das aplicações devido à alta densidade de energia que oferecem. Como foi visto anteriormente, partículas traçadoras devem ser pequenas para melhor acompanhar o escoamento, o que exige que fontes com alta densidade de energia sejam utilizadas para que a luz espalhada pelas pequenas partículas seja capaz de sensibilizar os sensores das câmeras que registram suas imagens.

Historicamente, lasers contínuos foram os primeiros a ser utilizados para PIV. Isto se deveu à disponibilidade destes lasers em vários laboratórios onde medições de escoamentos eram realizadas, pois esta é a fonte de luz monocromática utilizada nos anemômetros laser-Doppler. No entanto, as baixas energias fornecidas por estes lasers em cada pulso de iluminação necessário para a técnica PIV levaram à utilização de lasers pulsados de estado sólido. Dentre estes, o mais utilizado nas aplicações de PIV é o laser Nd-YAG, ou laser de Ítrio-Alumínio-Garneto ($Y_3Al_5O_{12}$) dopado com Neodímio. O laser Nd:YAG produz pulsos de luz de elevada energia e curta duração no comprimento de onda do infravermelho (1064 nm). Para aplicações de PIV, o feixe tem sua frequência dobrada por um cristal, produzindo feixes visíveis na cor verde, com comprimento de onda de 532 nm.

A taxa de repetição de pulsos de lasers Nd:YAG é, normalmente, da ordem de 10 Hz, valor muito baixo para a medição de escoamentos de interesse acadêmico e industrial que podem apresentar velocidades de dezenas, centenas ou até mesmo milhares de metros por segundo. Assim, na maioria das vezes, são utilizadas duas fontes lasers sincronizadas de modo que o tempo entre pulsos das duas fontes pode ser ajustado livremente de acordo com a velocidade do escoamento em estudo.

O plano de luz pode se gerado facilmente a partir do feixe cilíndrico da fonte laser utilizando-se uma combinação de lentes cilíndrica e esférica, como indicado na Figura 3.2. A lente cilíndrica, de distância focal negativa, tem a finalidade de expandir o feixe em um plano. A lente esférica é utilizada para convergir os raios de modo a produzir um plano de pequena espessura no foco da lente, ou cintura do feixe, e_p . Tipicamente utiliza-se espessura de plano de luz da ordem de 0,3 a 0,6 mm. A intensidade local da luz depende diretamente da potencia do laser e inversamente da altura $H(x)$ e da espessura do feixe.

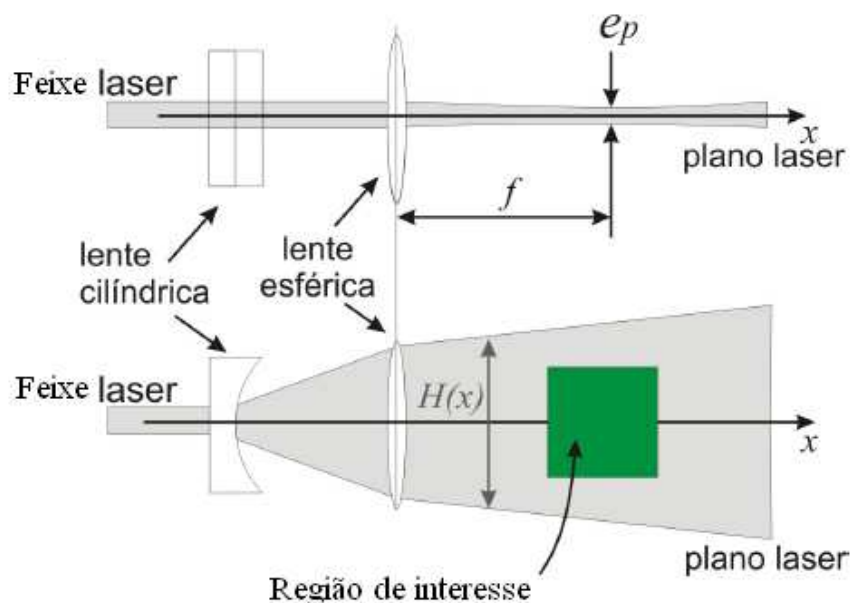


Figura 3.2 – Geração do feixe laser [10].

3.1.3. Registro de Imagens

Os recentes avanços verificados nos dispositivos para a aquisição de imagens eletrônicas têm levado ao abandono das técnicas fotográficas clássicas baseadas em filmes químicos. A principal vantagem das câmeras digitais sobre os filmes químicos é a disponibilidade imediata da imagem, o que permite uma

visualização instantânea da imagem adquirida, permitindo correções quase que em tempo real dos parâmetros utilizados no ensaio. Também, imagens eletrônicas já são disponibilizadas no formato digital, o que facilita as etapas posteriores de processamento através de algoritmos computacionais. Deve-se mencionar, no entanto, que apesar dos grandes avanços verificados nos sensores das câmeras digitais, as melhores resoluções espaciais que podem ser obtidas em imagens ainda são oferecidas por filmes químicos de alta resolução e grandes dimensões.

As imagens digitais utilizadas na técnica PIV são registradas utilizando sensores do tipo CCD (*“charged coupled device”*) ou CMOS (*“complementary metal oxide semiconductor”*). Trata-se de duas arquiteturas distintas de sensores de imagens que diferem no que diz respeito à utilização para PIV, na qualidade e velocidade de aquisição de imagens. Os sensores CCD são mais lentos, mas fornecem imagens de melhor qualidade. As câmeras digitais de altas taxa de aquisição de imagens são construídas com sensores CMOS

Os sensores CCD ou CMOS são dispositivos que convertem a luz (fótons) em cargas elétricas (elétrons). São formados em geral por uma matriz de elementos sensores, onde cada elemento individual, conhecido como pixel, apresenta dimensões da ordem $10 \times 10 \mu\text{m}^2$, ou 100 pixels / mm.

As câmeras digitais que utilizam sensores CCD operam, normalmente, no padrão de 30 Hz, ou 30 quadros por segundo. Este intervalo de tempo entre dois quadros de 33 ms é demasiadamente elevado mesmo para a medição de escoamentos com velocidades relativamente baixas, da ordem de poucos metros por segundo.

A Figura 3.3 apresenta o diagrama de sincronismo utilizado para contornar esta dificuldade e permitir a medição de escoamentos a altas velocidades, mesmo utilizando as câmeras operando a 30 Hz. Trata-se da técnica conhecida por seu nome em inglês, *Frame straddling*. O segundo diagrama de cima para baixo indicado na Figura representa a exposição da câmera. Este diagrama corresponde à câmera TSI-PIVCAM POWERVIEW Plus 4MP fabricada pela TSI Inc, que foi usada no presente trabalho. Pode-se notar que para esta câmera o tempo de exposição da imagem 1 é menor que aquele da imagem 2. Pode-se notar também que terminada a exposição da imagem 1 há um pequeno intervalo de tempo até que a câmera esteja pronta para a segunda exposição. Na câmera utilizada este tempo pode ser tão pequeno quanto 600 ns. O primeiro diagrama de cima para baixo na figura indica a localização no tempo dos dois pulsos do laser. Um equipamento eletrônico disponível permite controle total do intervalo

entre pulsos do laser. Assim, é possível conceber-se uma sequência de disparos dos pulsos do laser onde o primeiro pulso é disparado imediatamente antes do término da exposição 1 da câmera, aguarda-se o tempo de preparação do segundo quadro (da ordem de 600 ns) e dispara-se o segundo pulso imediatamente após o início da segunda exposição da imagem. Desta forma consegue-se, mesmo com uma câmera operando a 30 Hz, capturar duas imagens do escoamento que estão separadas por um intervalo de no mínimo 600 ns. Este pequeno intervalo é suficiente para medir escoamentos de centenas de metros por segundos.

Esta técnica de seqüenciamento de pulsos foi utilizada no presente trabalho estando incorporada no sistema *PIV* fabricado pela TSI Inc. Na verdade, esta é uma técnica universalmente utilizada por todos os laboratórios e fabricantes que utilizam a técnica *PIV*.

Deve-se mencionar que é possível e viável operar-se o sistema *PIV* formando imagens de dupla exposição em um mesmo quadro de imagem. Para isso, os dois pulsos do laser são disparados dentro do tempo de exposição de uma das imagens. Esta técnica elimina o limite superior das máximas velocidades que podem ser medidas com *PIV*, mas apresenta a dificuldade (que pode ser contornada com uso de dispositivos especiais) que o sentido de cada vetor velocidade não é determinado, uma vez que a informação sobre qual campo de imagens de partículas foi produzido pelo primeiro ou segundo pulso de laser é perdida. No presente trabalho utilizou-se técnica onde cada pulso do laser é disparado em imagens distintas. O livro de Raffel et al.[21] fornece informações detalhadas, não só sobre sensores digitais de câmeras, como também sobre os modos de operação do sincronismo laser-câmera para aplicações de *PIV*.

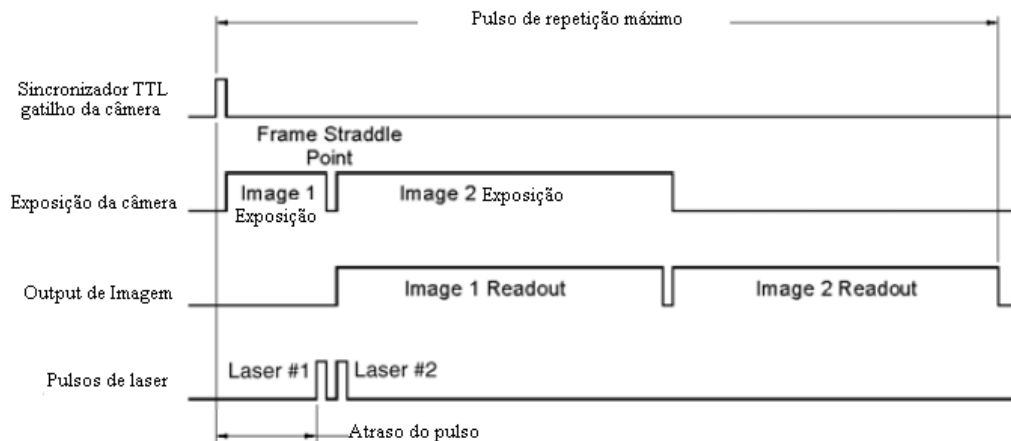


Figura 3.3 - Diagrama de sincronismo utilizado na aquisição de imagens com PIV [15].

3.1.4. Análise das Imagens

Uma vez capturado um par de imagens consecutivas das partículas traçadoras, a fase seguinte da técnica *PIV* é a análise das imagens com o objetivo de determinar o campo de deslocamento das partículas traçadoras no intervalo de tempo correspondente ao intervalo entre os pulsos dos lasers.

Devido ao elevado número de partículas presentes em uma imagem típica de *PIV*, torna-se impossível identificar a posição de cada partícula em cada uma das imagens. Esta é uma técnica possível de ser utilizada em imagens com pequeno número de partículas traçadoras, sendo conhecida como Velocimetria por Acompanhamento de Partículas, ou pela sigla em inglês *PTV* de *Particle Tracking Velocimetry*. O número de vetores velocidade obtidos com esta técnica é, obviamente, muito menor que aquele obtido pela técnica *PIV* que utiliza valores de concentrações de partículas muito maiores. Também, como será descrito brevemente a seguir, na técnica *PIV* os vetores velocidades são medidos nas posições previamente determinadas pelo usuário, ao contrário da técnica *PTV* onde os vetores velocidade são determinados nas posições aleatórias onde se encontram as partículas, exigindo uma etapa posterior de interpolação do campo vetorial para posições mais convenientes para o estudo do escoamento.

Como já mencionado, existem duas técnicas de análise de imagens que são empregadas dependendo da forma como as imagens foram capturadas. Se as imagens foram capturas em quadros distintos utiliza-se o processamento baseado na técnica da correlação cruzada das imagens. Caso as duas imagens

tenham sido capturadas em um mesmo quadro, utiliza-se o processamento baseado na auto-correlação das imagens. Novamente, recomenda-se ao leitor interessado no assunto consultar a referência [21] e as demais referências ali citadas para um melhor conhecimento dos fundamentos destas técnicas. A seguir é apresentada uma breve descrição do método da correlação cruzada das imagens, utilizada no presente trabalho.

Método de Correlação Cruzada das Imagens

A Figura 5.4 apresenta um exemplo de uma imagem real das partículas traçadoras capturada durante um experimento realizado como parte do presente trabalho. Pode-se notar que a alta concentração de partículas impede que a posição de uma dada partícula seja identificada na segunda imagem de aspecto semelhante à primeira.

Para determinar o deslocamento desejado das partículas utiliza-se a técnica estatística conhecida como correlação cruzada de funções, utilizada para determinar padrões de semelhança entre funções. Para aplicar este tipo de análise às imagens de partículas, abre-se mão da determinação do deslocamento individual de cada partícula e determina-se o deslocamento de pequenas regiões no escoamento contendo grupos de poucas partículas, digamos 10 partículas. As dimensões destas regiões, denominadas janelas de interrogação, estão associadas à resolução espacial da técnica, em outras palavras, representam um ponto de medição. A hipótese admitida é que estas janelas são pequenas em relação às dimensões do escoamento e que gradientes de velocidade não são apreciáveis nestas regiões. Assim, espera-se que o padrão formado pelas partículas na janela de interrogação em torno de uma dada posição na Imagem 1, seja transportado para a Imagem 2, adquirida em um pequeno intervalo de tempo posterior, sem que seja alterado significativamente. A tarefa do algoritmo de correlação cruzada é identificar a posição deste padrão na Imagem 2.

A Figura 3.4 mostra de maneira esquemática o procedimento adotado. Na figura, as imagens A e B foram capturadas com um intervalo de tempo Δt conhecido. Em torno de um dado ponto da imagem A é posicionada uma janela de interrogação com dimensões tais que incorpore a imagem de cerca de 10 partículas. A imagem da janela de interrogação destacada é uma função bi-dimensional da posição, $I_1(x,y)$, que representa a intensidade da imagem em cada ponto. Em uma imagem binária, as partículas são representadas por um valor 1, enquanto o fundo é representado pelo valor zero. A imagem da janela de

interrogação é comparada com todas as possíveis posições na imagem B. Para cada posição determina-se o valor da função de correlação cruzada dada pela equação 3.8, onde $I_2(i+\Delta x, j+\Delta y)$ representa a região na imagem B deslocada de $(\Delta x, \Delta y)$ que está sendo comparada com a imagem da janela de interrogação I_1 . Para cada posição de comparação é computado o valor da função correlação cruzada, que pode ser observada na representação tri-dimensional da Figura 3.4. As coordenadas onde o valor da função é máximo representam a posição mais provável onde o padrão de partículas contido na janela de interrogação se deslocou no intervalo de tempo Δt . Repetindo-se este procedimento para diversas posições da janela de interrogação na imagem 1, determina-se o campo completo de velocidade desejado.

A equação 3.8 está apresentada em sua forma discreta, onde os índices i e j representam as coordenadas x e y . M é o tamanho da janela de interrogação da primeira imagem e N é o tamanho da janela de interrogação da segunda imagem

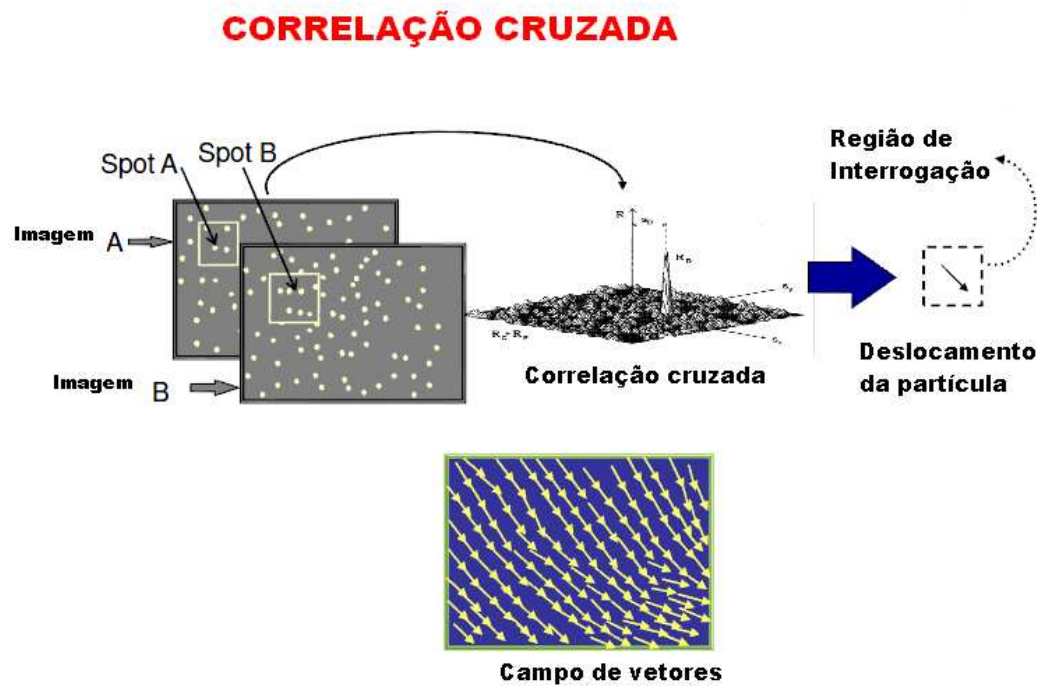


Figura 3.4 – Correlação cruzada de duas janelas de interrogação [34].

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-M}^M \sum_{j=-N}^N I_1(i, j) I_2(i + \Delta x, j + \Delta y) \quad (3-8)$$

A função de correlação pode ser avaliada no espaço de frequências utilizando o teorema Wiener-Kinchin, como,

$$R_{II} \Leftrightarrow \hat{I}_1 \cdot \hat{I}_2^* \quad (3-9)$$

onde * denota a conjugação complexa e $\hat{I}_1$ e $\hat{I}_2^*$ são as transformadas de Fourier das funções I_1 e I_2 , respectivamente. A vantagem de usar-se a Eq.(3-9) ao invés da Eq.(2-8) é que o esforço computacional envolvido na avaliação da equação 3.9 é significativamente menor que aquele necessário para avaliar a correlação direta representada pela equação 3.8.

A avaliação dos deslocamentos baseada na posição dos picos das funções de correlação está limitada a uma resolução da ordem de 1 pixel. Para melhorar esta resolução, utiliza-se uma metodologia onde o pico de correlação é ajustado por uma função contínua. O ponto de máximo desta função é então determinado, agora com resolução sub-pixel. Tipicamente, utilizando-se uma função Gaussiana ou parabólica para representar o pico de correlação, obtém-se uma resolução da ordem de 1/10 a 1/20 da dimensão correspondente no escoamento real a um pixel. No presente trabalho utilizou-se um ajuste Gaussiano, como implementado no programa *INSIGHT 3G* da *TSI Inc*.

Como o resultado do processamento das imagens pela técnica da correlação cruzada fornece uma excelente resolução espacial, é possível pensar-se em um algoritmo híbrido que partindo do campo de velocidade determinado pela técnica *PIV* determina o deslocamento de cada partícula individual usando um algoritmo do tipo acompanhamento de partículas, ou *PTV*. Para que seja possível identificar o deslocamento de cada partícula individual utiliza-se como guia o vetor deslocamento determinado pela técnica *PIV*.

No presente trabalho utilizou-se esta combinação *PIV-PTV* na implementação desenvolvida pela *TSI* e disponibilizada no programa *INSIGHT 3G*. Trata-se do algoritmo denominado *Super-resolution PIV*. Os resultados obtidos no presente trabalho com este técnica foram excelentes, notando-se um aumento na resolução espacial dos campos de vetores velocidade determinados com comparado com a técnica *PIV* convencional [2]. Como desvantagem associada ao uso desta técnica pode-se mencionar o aumento significativo verificado no tempo de processamento das imagens.

3.1.5.

Pós-processamento dos vetores velocidade

A técnica de *PIV* tem como principal vantagem sobre as técnicas convencionais como o *LDV*, a determinação de uma quantidade significativa de vetores velocidade instantânea, cobrindo regiões extensas do escoamento. Esta

capacidade permite o cálculo de importantes grandezas que envolvem derivadas espaciais ou grandezas integrais, como vorticidade, taxas de deformação, fluxos de massa, circulação, dentre outras.

Dentre os milhares de vetores velocidade medidos instantaneamente é provável que um pequeno número apresente valores irreais. Estes vetores espúrios são prontamente identificados quando comparados com seus vizinhos. Quando a técnica *PIV* é bem empregada, o número destes vetores pode ser da ordem de 1 a 2% do total de vetores, podendo mesmo ser nulo. De qualquer modo, caso presentes, estes vetores espúrios devem ser identificados, removidos e substituídos por vetores interpolados entre seus vizinhos. Caso não sejam substituídos, os vetores espúrios podem produzir resultados errôneos nos campos de quantidades derivadas, como é o caso dos campos de vorticidade.

Existem diversos procedimentos para remoção automática de vetores espúrios removidos. Alguns procedimentos são baseados em critérios de desvio máximo em relação a vizinhos. Alguns métodos baseiam-se na verificação da conservação de massa em células vizinhas aos vetores. No presente trabalho, foram utilizados os algoritmos de remoção e interpolação de vetores espúrios disponíveis no programa *INSIGHT 3G* da *TSI Inc.* [14].