

Velocimetria por Imagem de Partículas

Juliana Kuhlman Abrantes

Igor Braga de Paula

Luís Fernando Azevedo

Departamento de Engenharia

Mecânica

PUC-RIO

jkabrantes@gmail.com

igordepaula@puc-rio.br

Lfaa@puc-rio.br

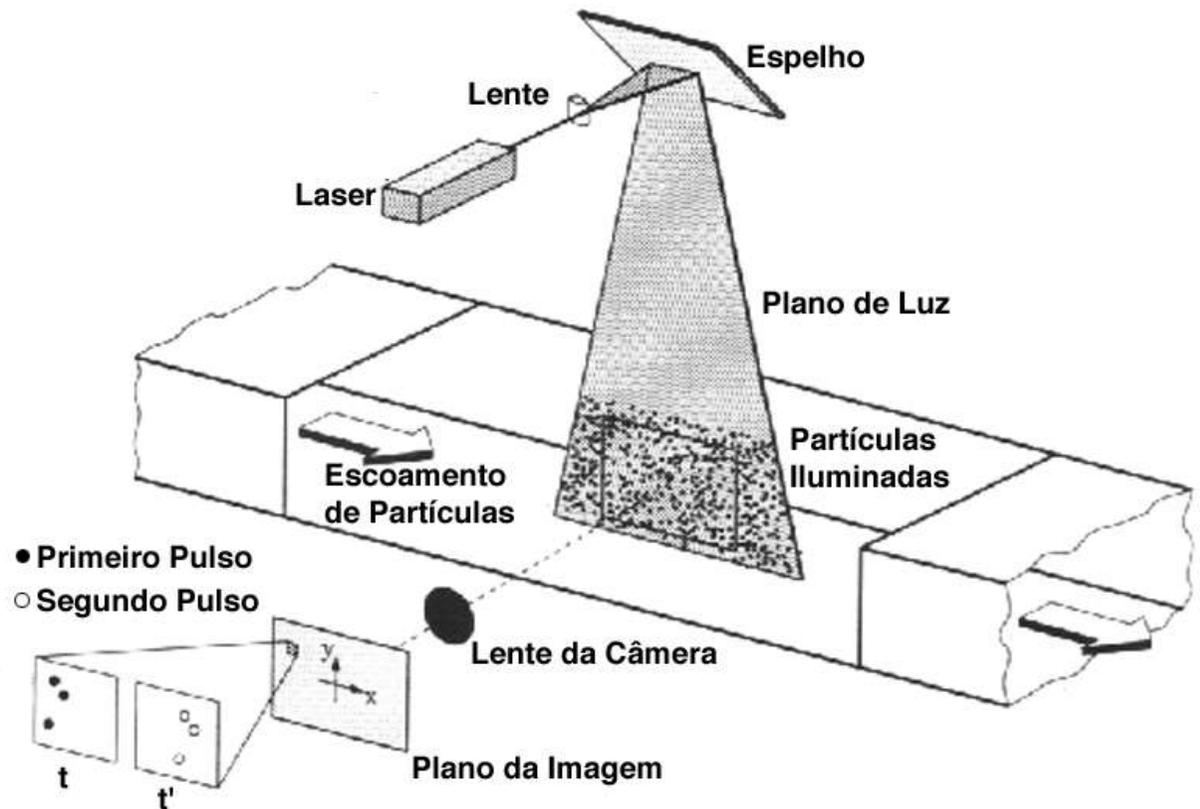
Medida de Velocidade

- Medidas Pontuais
 - tubo de Pitot
 - anemômetro de fio quente
 - anemômetro laser-Doppler
- Medidas de Campo Completo
 - velocimetria por acompanhamento de partículas (PTV)
 - velocimetria por *speckles* de laser (LSV)
 - velocimetria por imagem de partículas (PIV)
 - PIV estéreooscópico
 - PIV holográfico
 - PIV tomográfico

VELOCIMETRIA DE LUZ PULSADA

- Registro da posição de partículas traçadoras em dois instantes de tempo

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



DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- Sistema de Iluminação Pulsada (plano/volumétrico)
 - fonte incoerente (estrobo ou flash)
 - fonte coerente (lasers: Ar^+ contínuo, Rubi, Vapor de cobre, Nd-YAG)
 - sistema de lentes para formação de plano de luz

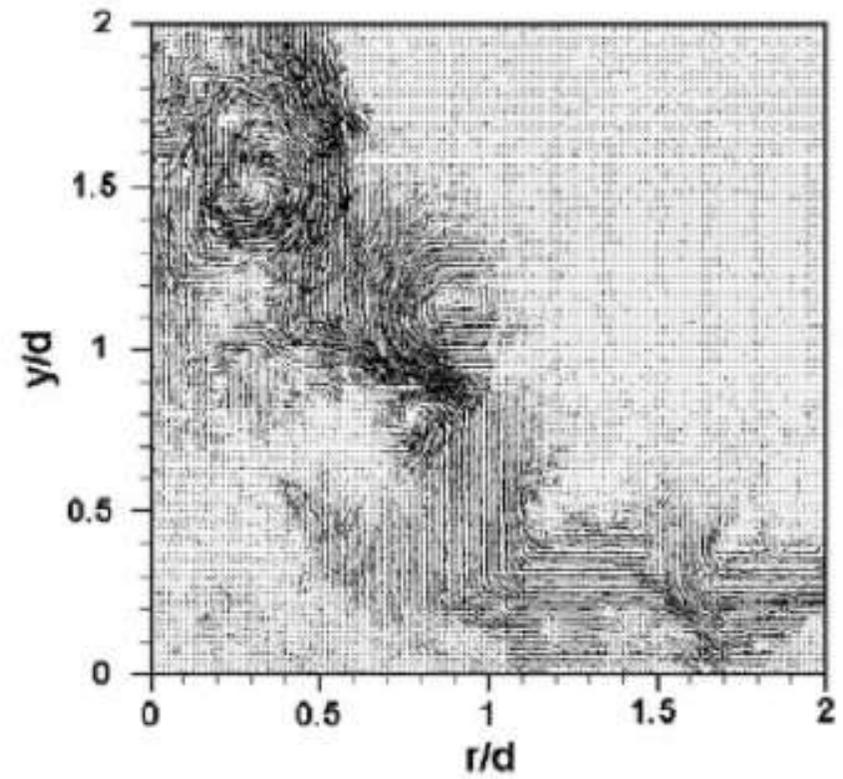
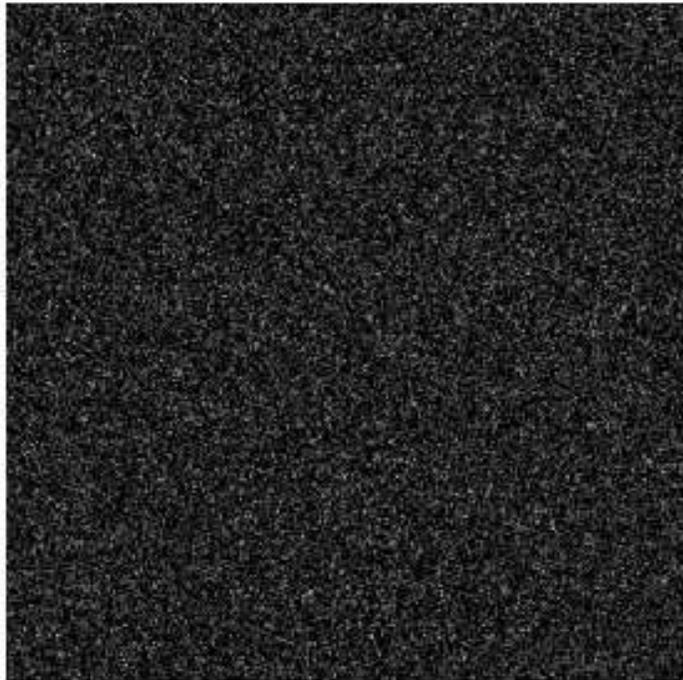
DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- Partículas Traçadoras
 - sólidos em meio líquido ou gasoso
 - bolhas de gases em meio líquido
 - gotículas em gás ou líquido imiscível
- Registro da Imagem
 - filme fotográfico
 - meio eletrônico
 - filme holográfico

DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

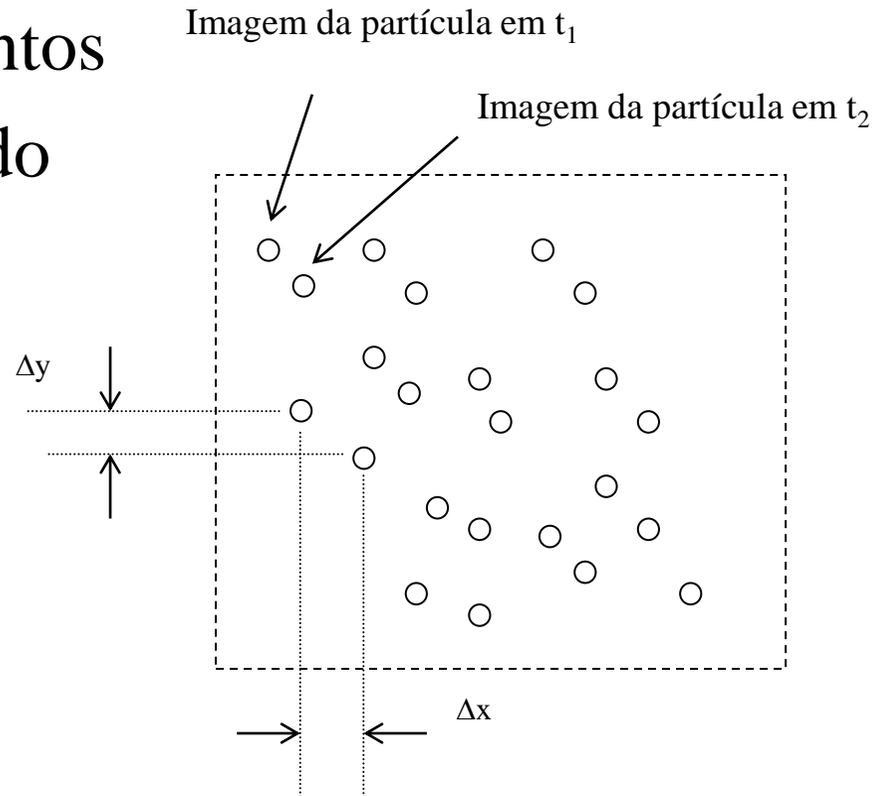
- Digitalizador de Imagens
- Computador e Software para Processamento e Análise de Imagens
 - detetor digital ($1000 \times 1000 = 1 \times 10^6$ pixels)
 - filme fotográfico (300 linhas/mm, 100×125 mm = 1.1×10^9 pixels)
- Software para Apresentação e Pós-processamento dos Resultados

Visualização X Medição



DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- Pequenos deslocamentos
- Δt pequeno comparado com escalas do escoamento
- Análise manual das imagens
- análise automática



MODOS DE OPERAÇÃO

VELOCIMETRIA DE LUZ PULSADA

- Velocimetria por Acompanhamento de Partículas (PTV)
 - $N_I \ll 1$
 - baixa resolução espacial
 - vetores situados aleatoriamente (interpolação necessária)
- Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)
 - $N_I > 10 - 20$
 - alta resolução espacial
 - análise das imagens é mais complexa (métodos estatísticos)

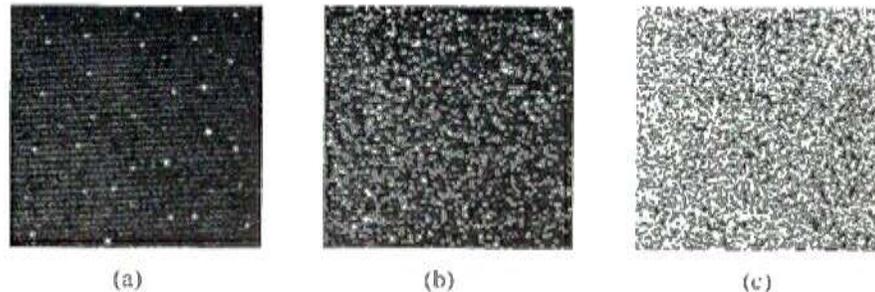


Fig. 1.5. The three modes of particle image density: (a) low (PTV), (b) medium (PIV), and (c) high image density (LSV).

RESOLUÇÃO ESPACIAL E INCERTEZA

- Resolução Espacial
 - maior deslocamento espacial das partículas, Δx_{max} , determina a resolução espacial
 - intervalo de tempo entre pulsos escolhido tal que :
 - $u_{max} \Delta t < \Delta x_{max}$
 - valores de $\Delta x_{max} = 0,3$ mm são reportados na literatura
 - resolução espacial vem sendo melhorada constantemente (PIV de super resolução)

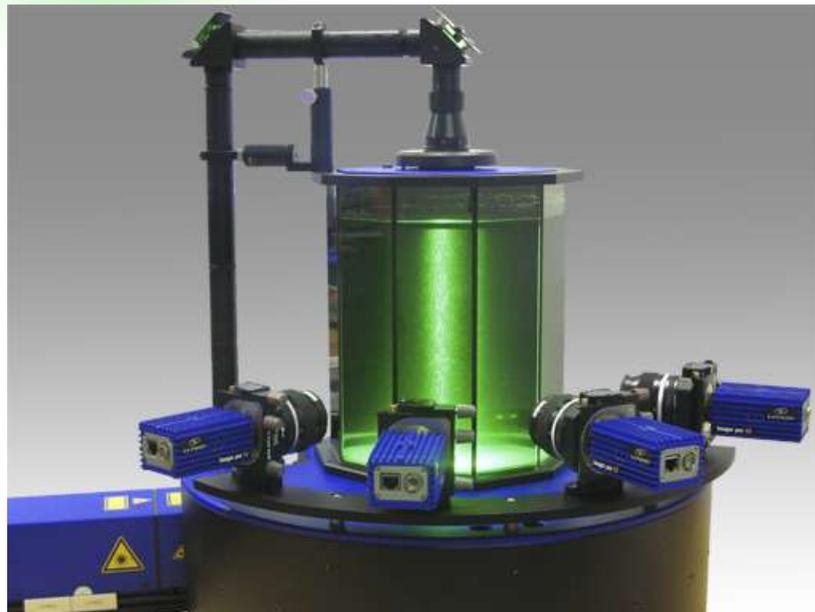
RESOLUÇÃO ESPACIAL E INCERTEZA

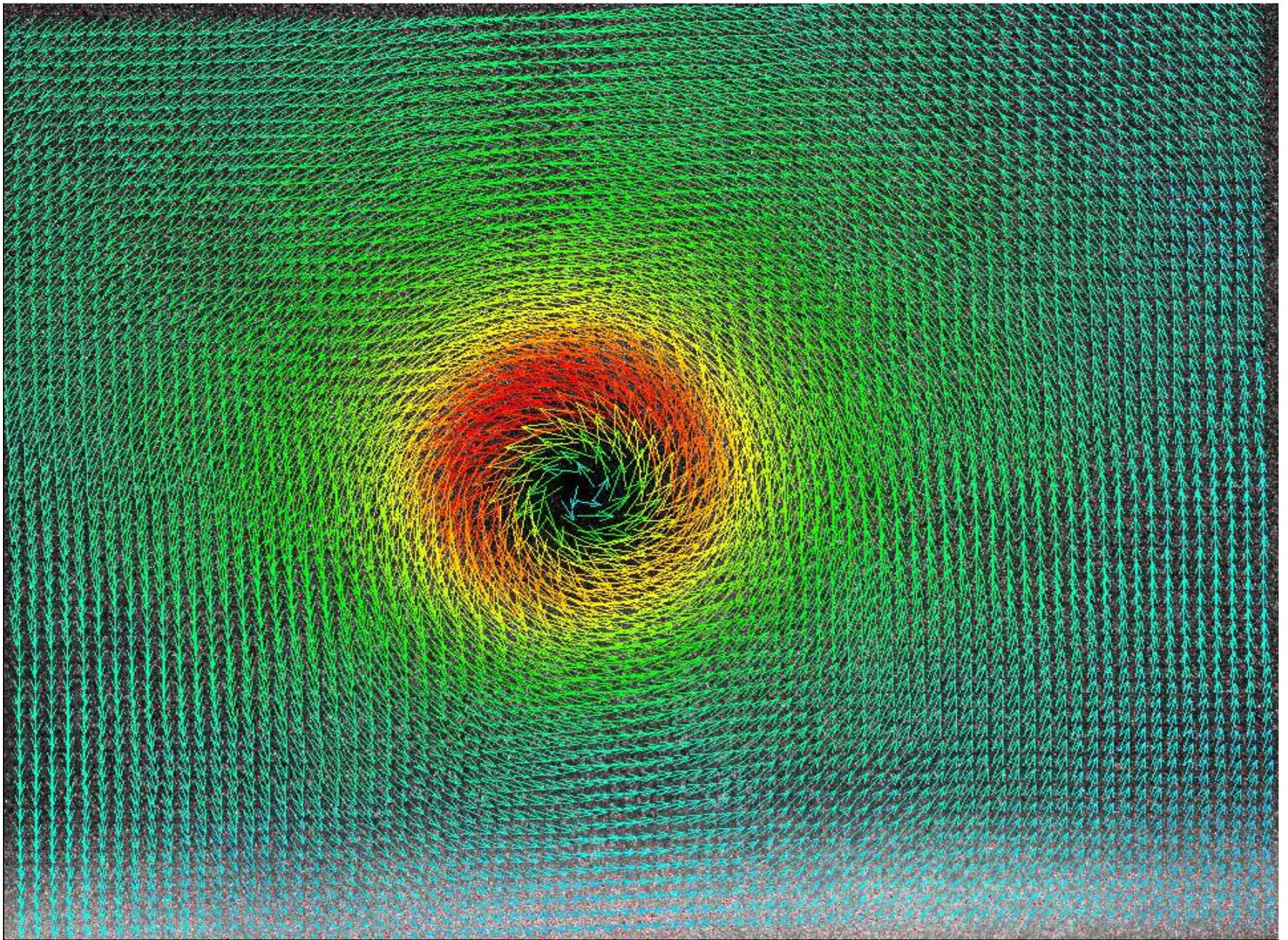
$$\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

$\sigma_{\Delta t}$ é normalmente muito pequena

$$\Delta x_{\max} = 0,30 \text{ mm}, \quad \sigma_u / u_{\max} = 1\% \quad (\text{da ordem de LDV})$$

SISTEMA PIV COMERCIAL



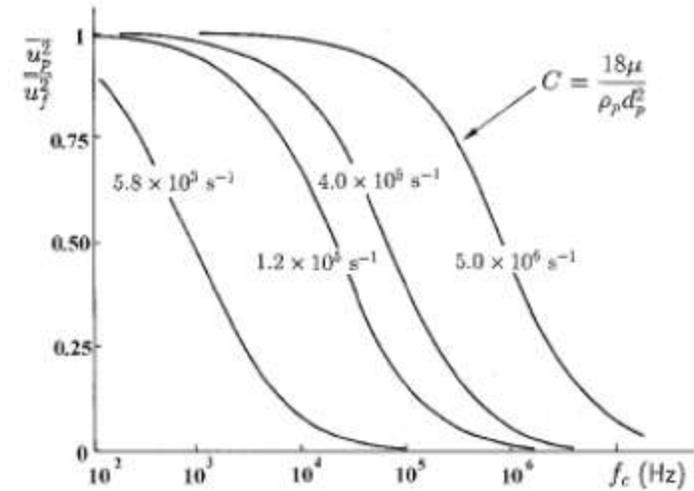


DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- Aquisição das imagens
- Pré-processamento das imagens
- Processamento das imagens
- Pós-processamento dos campos de velocidade

Partículas traçadoras

- Dinâmica
 - Devem seguir o escoamento



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

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

$$S = \frac{1}{d_p} \sqrt{\frac{v_f}{\omega}} < 1$$

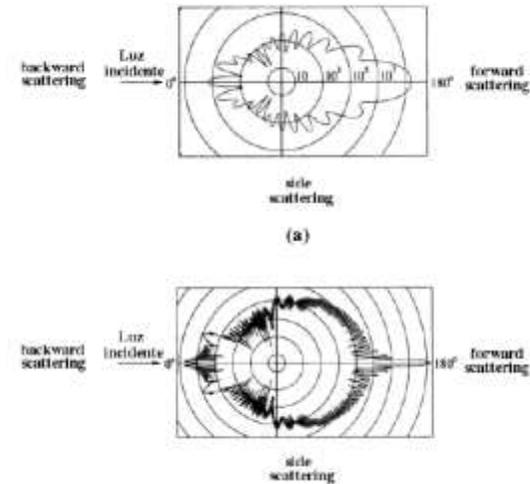
$$\omega_{\max} = \frac{v_f}{d_p^2}$$

$$\omega_{\max} = 10^4 \text{ Hz, para } d_p = 10 \text{ } \mu\text{m}$$

Diâmetro pequeno!

PIV - CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

- Partículas
 - Devem espalhar luz suficiente para o registro da imagem
 - Espalhamento de luz (Teoria de
 - Tamanho da partícula
 - Razão dos índices de refração para
 - Forma
 - Orientação
 - Ângulo de observação
 - Grandes diâmetros espalham mais luz!



Partículas

- Partículas para escoamento de líquidos
(tamanho típico: 10 - 30 μm)

Tipo	Material	Diâmetro médio, μm
Sólido	Poliestireno	10-100
	Alumínio	2-7
	Esferas de vidro	10-100
Líquido	Diferentes óleos	50-500
Gas	Bolhas de oxigênio	50-1000

Partículas

- Partículas para escoamento de gases
(tamanho típico 1 - 5 μm)

Tipo	Material	Diâmetro médio, μm
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

- energia requerida: > 10 -200 mJ/pulso

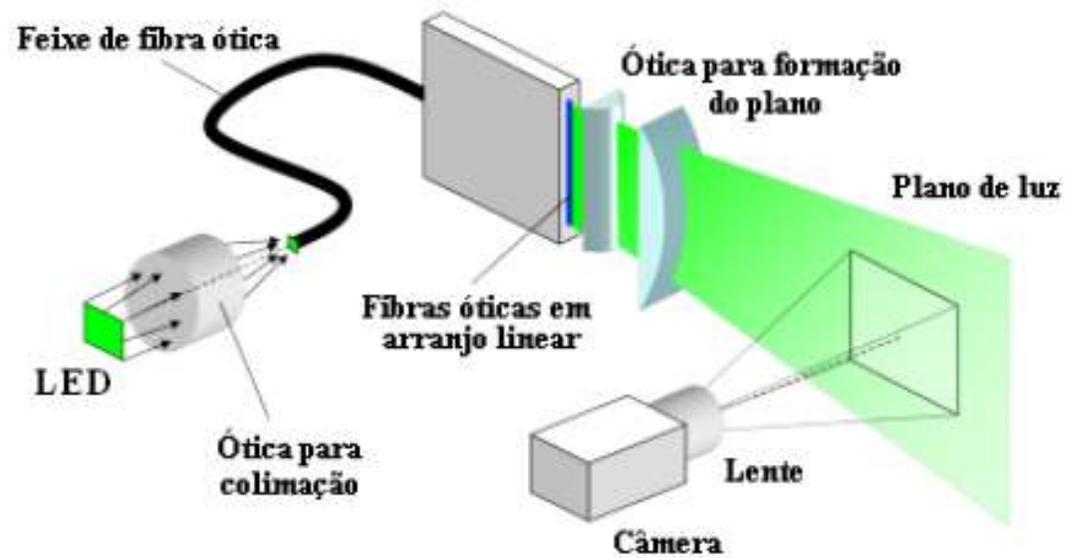
Iluminação

- Lasers

Tipo	λ [nm]	Energia por pulso [mJ]	Taxa de repetição [Hz]	Tempo mínimo entre pulsos [μ s]	Duração do pulso [μ s]
Vapor cobre	510 / 578	8	5000 a 10000	100	0.030
Ar ⁺ CW (“cortado”)	488 / 514	1 a 10	10 a 100	1000	1.000
Rubi pulso-duplo	694	1000 a 10000	0.03	1	0.025
Nd:YAG	1064 \rightarrow 532	20 a 400	10 a 30	0	0.005 a 0.010
Nd:YLF	527	1 a 20	1000 a 10000	0	0.070 a 0.0150

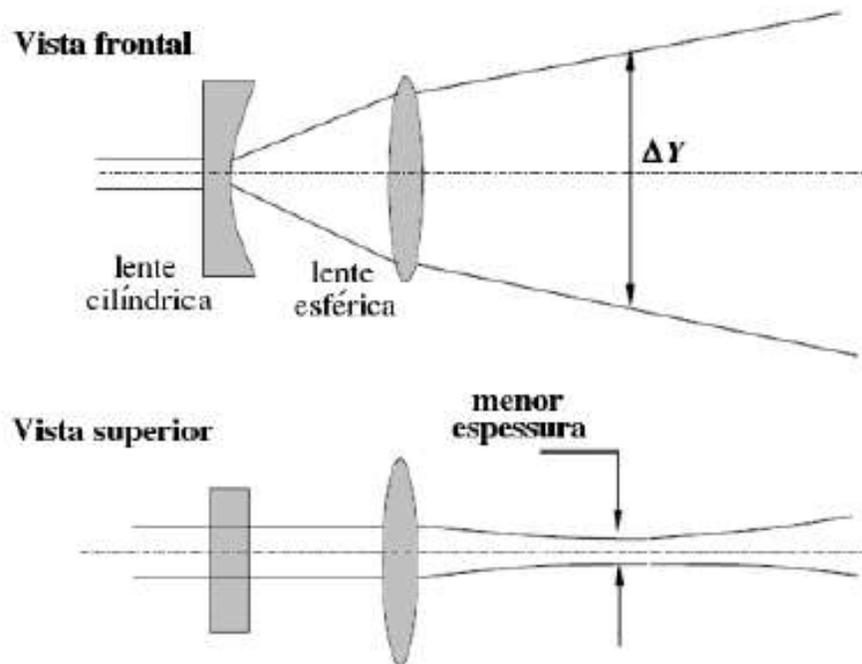
Iluminação

- LED's



Iluminação

- Formação do plano de luz



Registro das Imagens

- CCD (charged couple device)
 - matriz de sensores $10 \times 10 \mu\text{m}^2$ ou 100 pixels/mm
 - Tamanhos típicos usados em PIV: 650 x 480, 1000 x 1000, 4000 x 4000 pixels
 - Tipos de sensores CCD:
 - Full frame,
 - Frame transfer
 - Progressive scan Interline transfer (com micro lentes)
(intervalo de tempo de $1 \mu\text{s}$ – possibilita medição de escoamento transônico com pulso único / quadro duplo e correlação cruzada)

Registro das Imagens

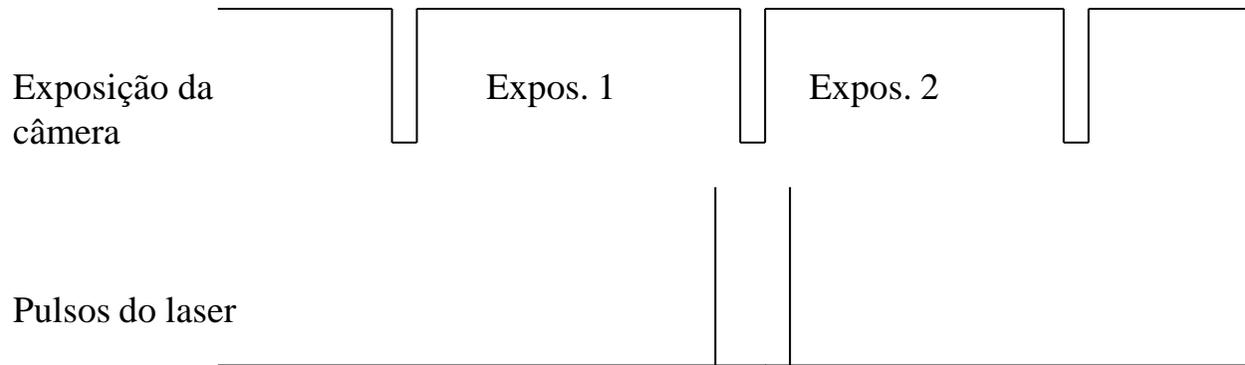
- Sensores CMOS (complementary metal oxide semiconductor)
 - matriz de sensores $20 \times 20 \mu\text{m}^2$
 - Menos sensíveis à luz
 - Acesso individual a cada pixel
 - Funções integradas no chip: amplificação, transformações não lineares
 - Número de pixels ativos selecionado: sub-domínios ativos
 - Altas taxas de aquisição

Modelo	Tamanho do sensor [pixels x pixels]	Taxa de aquisição máxima [quadros por segundo]	Número máximo de quadros
PCO.1200hs	1280 x 1024	636	762
TSI PowerView HS2000	1024 x 1024	2000	8000
Photron SA1	1024 x 1024	5000	24000

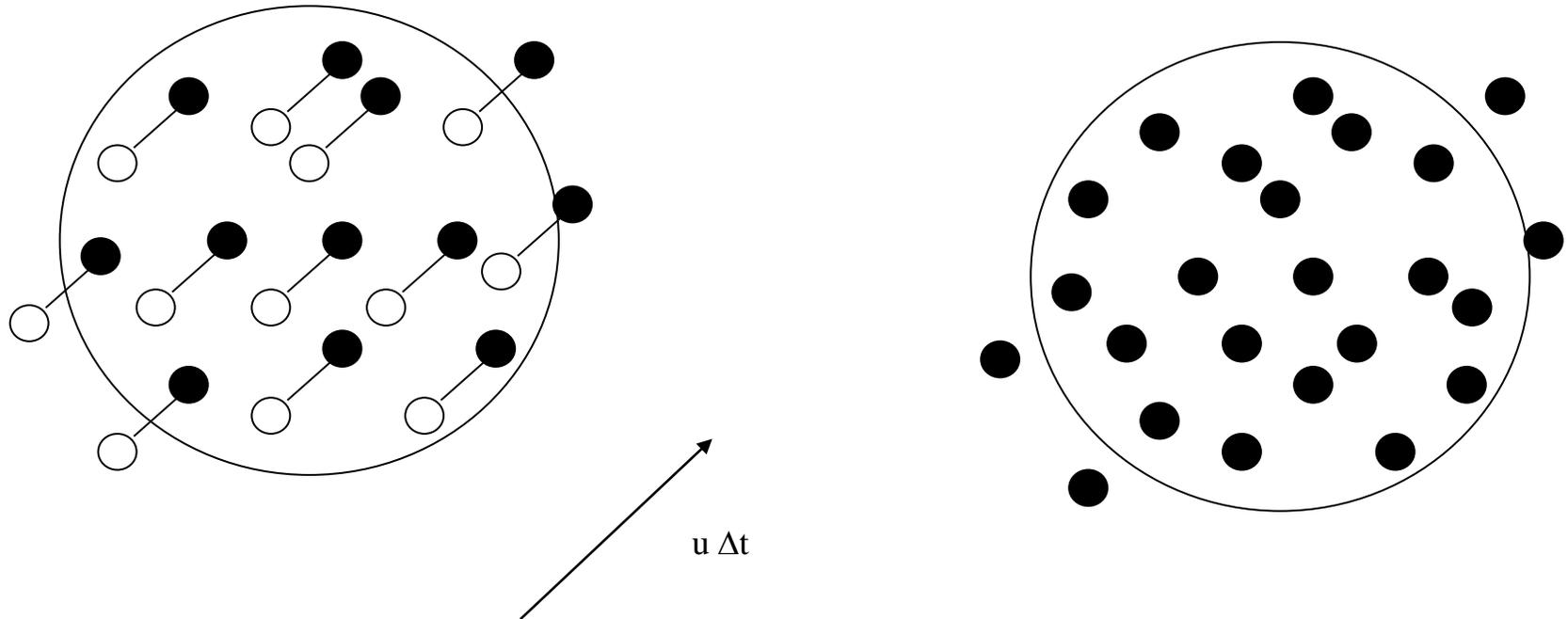
Registro das Imagens

– Modos de Sincronismo

- clock próprio
- sincronismo externo
- obturador eletrônico
- clock próprio + sincronismo do laser (frame straddling)



Processamento das Imagens - PIV



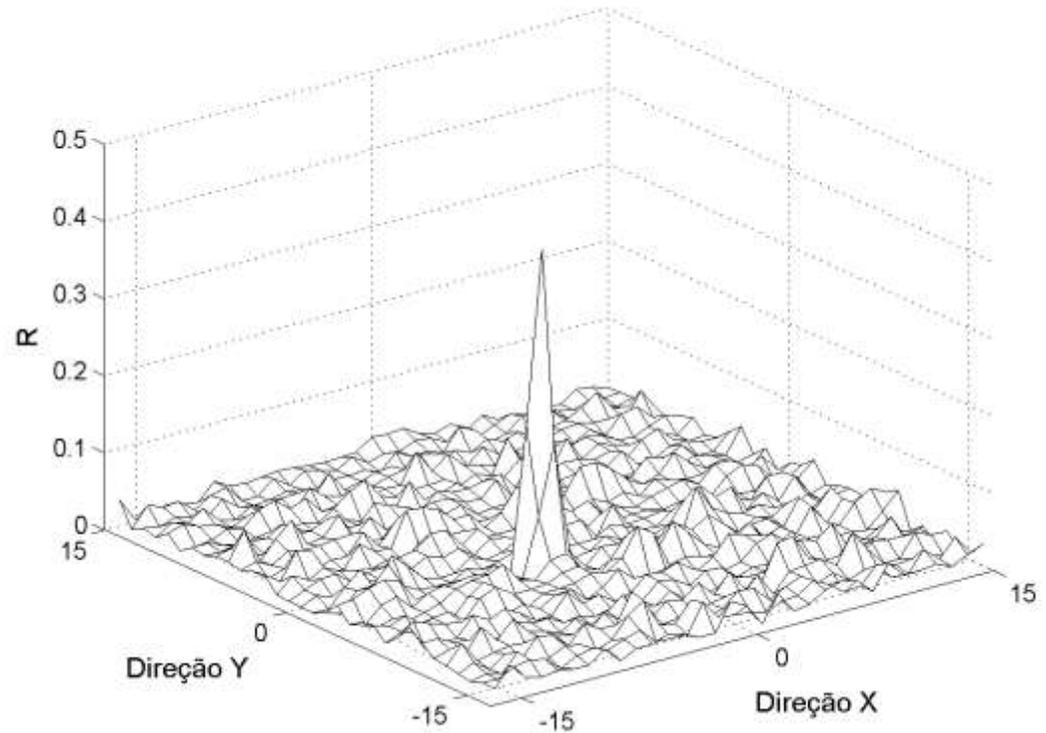
Estimação dos deslocamentos

- Correlação

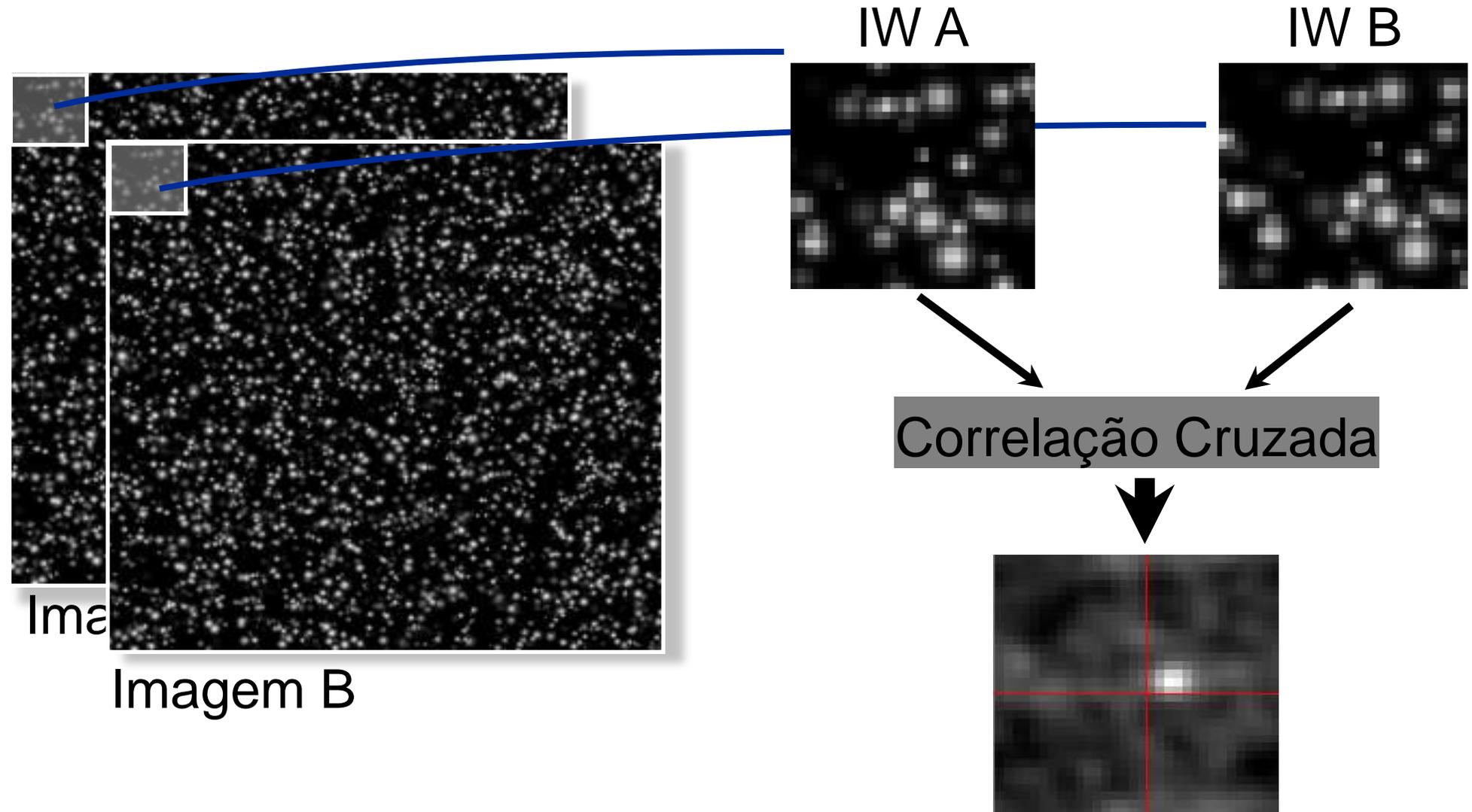
$$R(\Delta i, \Delta j) = \sum_i \sum_j I_1(i, j) I_2(i + \Delta i, j + \Delta j)$$

- Na prática, utilizam-se algoritmos rápidos baseados em FFT

$$R^* = I_1(x, y) \oplus I_2(x, y) = F^{-1} \left\{ \tilde{I}_1(k_x, k_y) \cdot \text{conj}[\tilde{I}_2(k_x, k_y)] \right\}$$

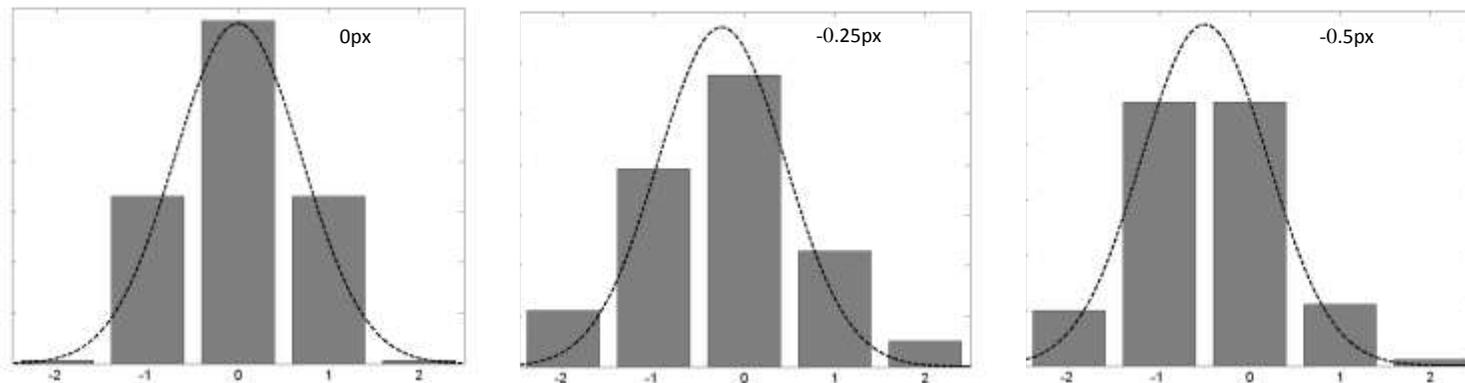


Correlação Cruzada de Imagens



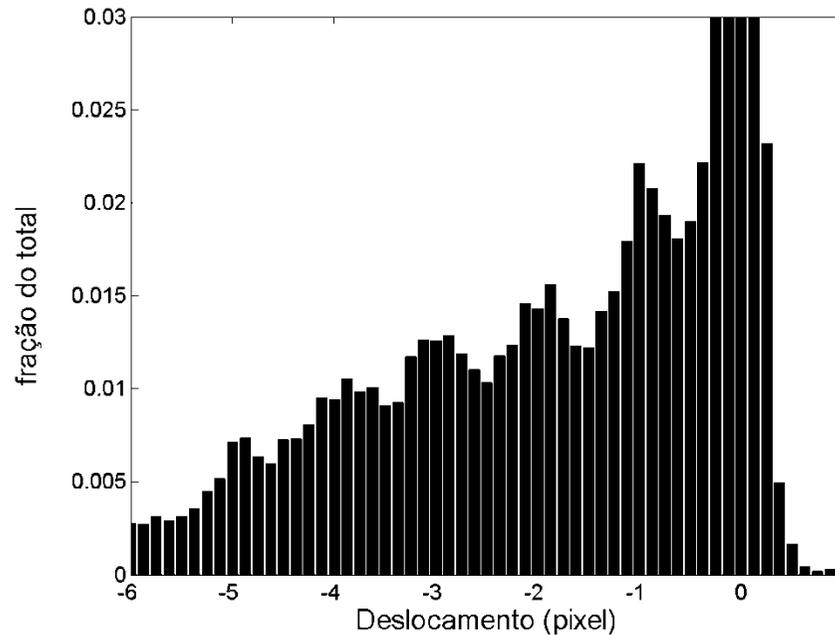
Detecção dos picos de correlação

- Imagens originais são discretas, portanto picos são localizados com resolução da ordem de 1 pixel
- Métodos para localização de picos com resolução sub-pixel (da ordem de $1/20$ pixel):
 - Ajuste parabólico, gaussiano, Wittaker, dentre outros



Detecção dos picos de correlação

- As funções de interpolação conferem diferentes concentrações de vetores em torno de pixels inteiros

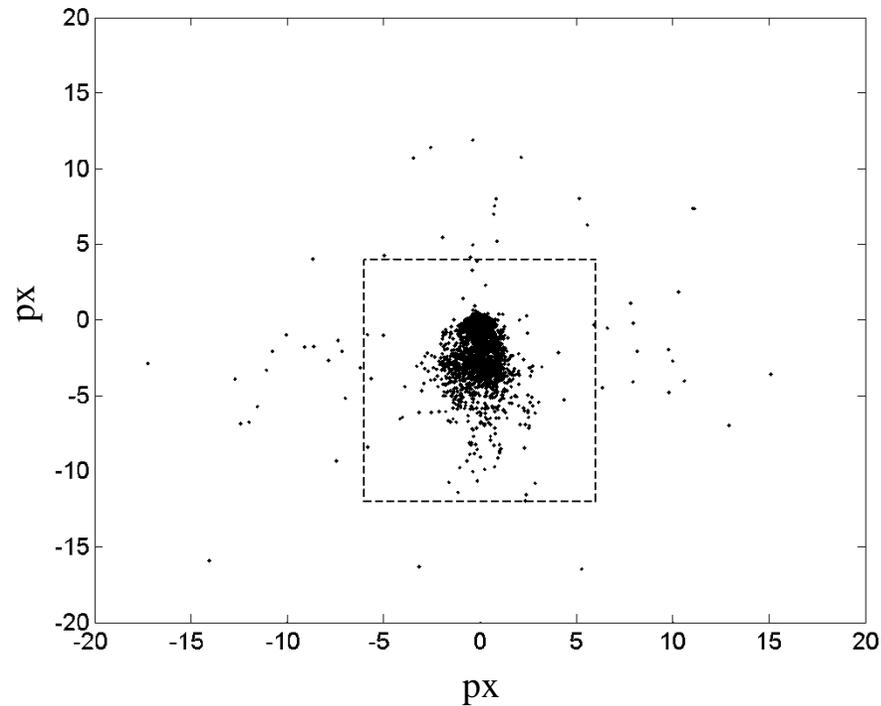


Pós-processamento

- Técnica PIV quando bem empregada gera cerca de 95% de vetores válidos.
- Cálculo de quantidades derivadas do campo de velocidade exige eliminação dos vetores errados
 - Detecção e remoção de vetores suspeitos
 - Análise global dos deslocamentos
 - Comparação com vizinhos

Pós-processamento

- Detecção e remoção de vetores suspeitos
 - Análise global dos deslocamentos

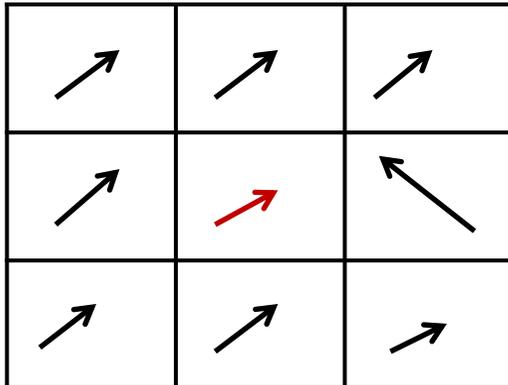


Pós-processamento

– Detecção e remoção de vetores suspeitos

- Comparação com vizinhos.

- Existem inúmeros métodos (um dos mais utilizados é o teste da mediana normalizada).



$$resíduo_{norm} = \frac{|U - U_m|}{r_m - \varepsilon}$$

$$e \approx 0.1px$$

r_m = mediana dos resíduos

Vetor Inválido

$$resíduo_{norm} > \text{limiar}$$

PIV- Considerações Práticas

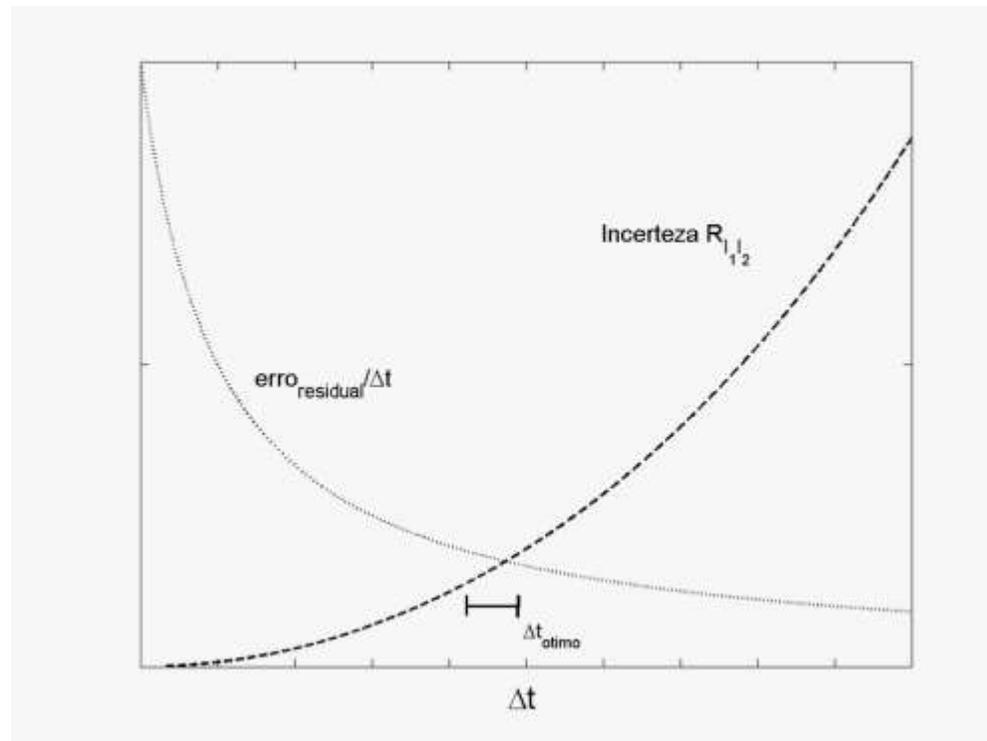
- Intervalo entre Pulsos
 - parâmetro mais importante
 - mais fácil e preciso de controlar
 - ajustado para minimizar:
 - perdas de pares no plano (correlação)

$$\sqrt{u^2 + v^2} \Delta t < \frac{1}{4} \frac{d_I}{M}$$

- perdas de pares através do plano: Δt tal que deslocamento seja menor que $0,25 \Delta z_0$

PIV- Considerações Práticas

- Intervalo entre Pulsos



PIV- Considerações Práticas

- Exemplo: simulador PIV

