

# Velocimetria por Imagem de Partículas

Juliana Kuhlman Abrantes

Igor Braga de Paula

Luís Fernando Azevedo

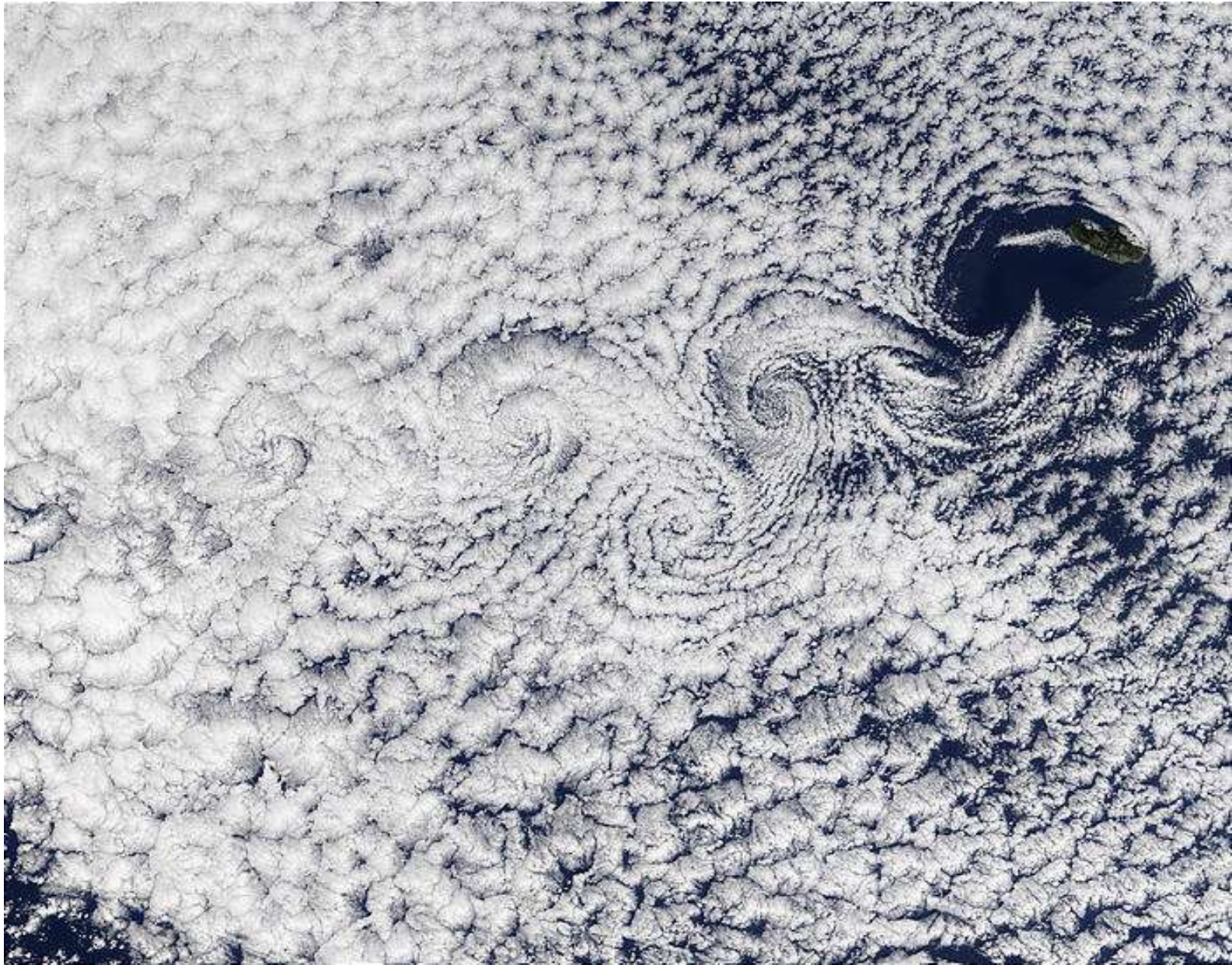
Mais detalhes no Livro: EPPT 2012/ABCM

MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS  
UTILIZANDO VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE  
PARTÍCULAS

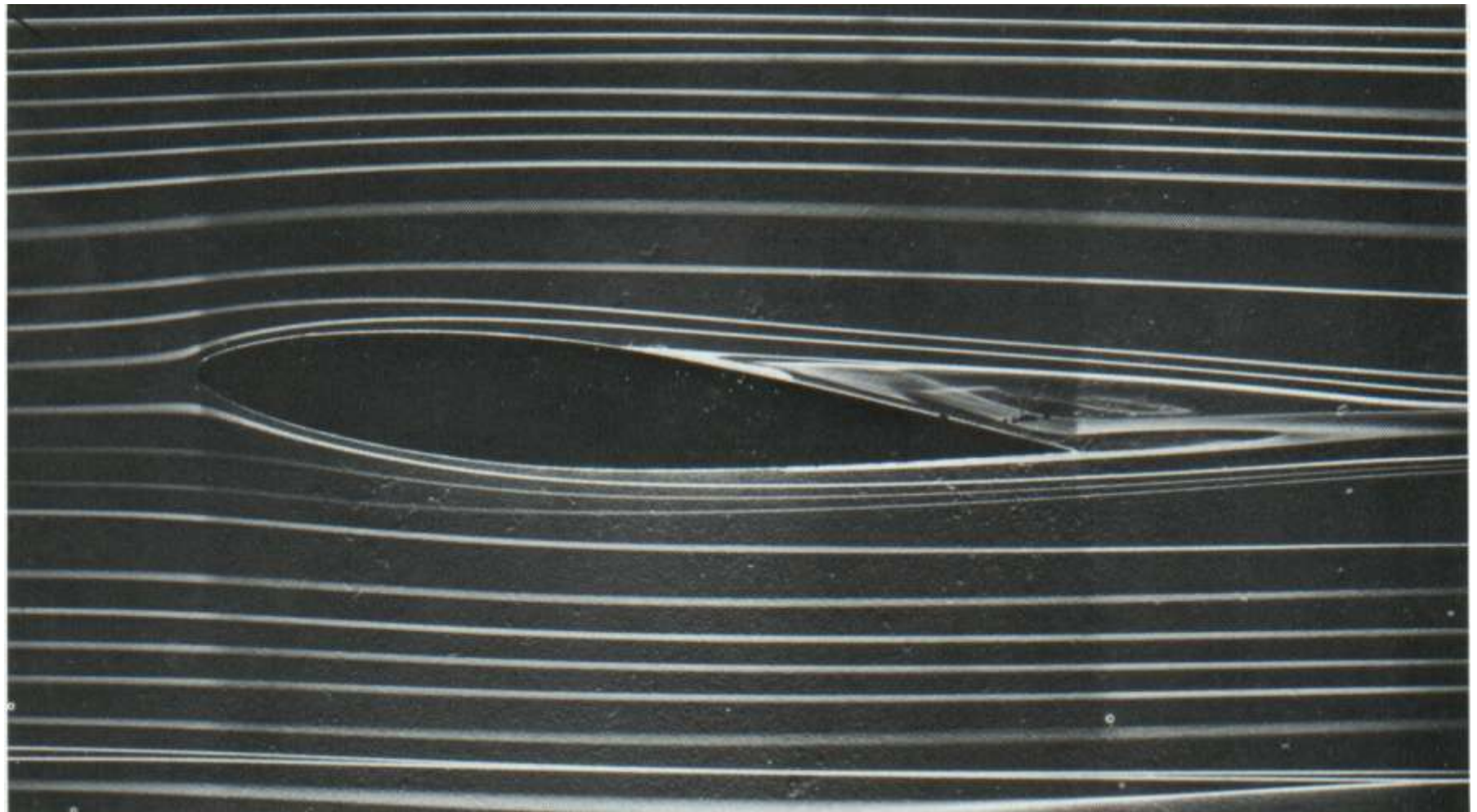
[http://lef.mec.puc-rio.br/wp-content/uploads/2015/04/EPTT\\_PIV.pdf](http://lef.mec.puc-rio.br/wp-content/uploads/2015/04/EPTT_PIV.pdf)

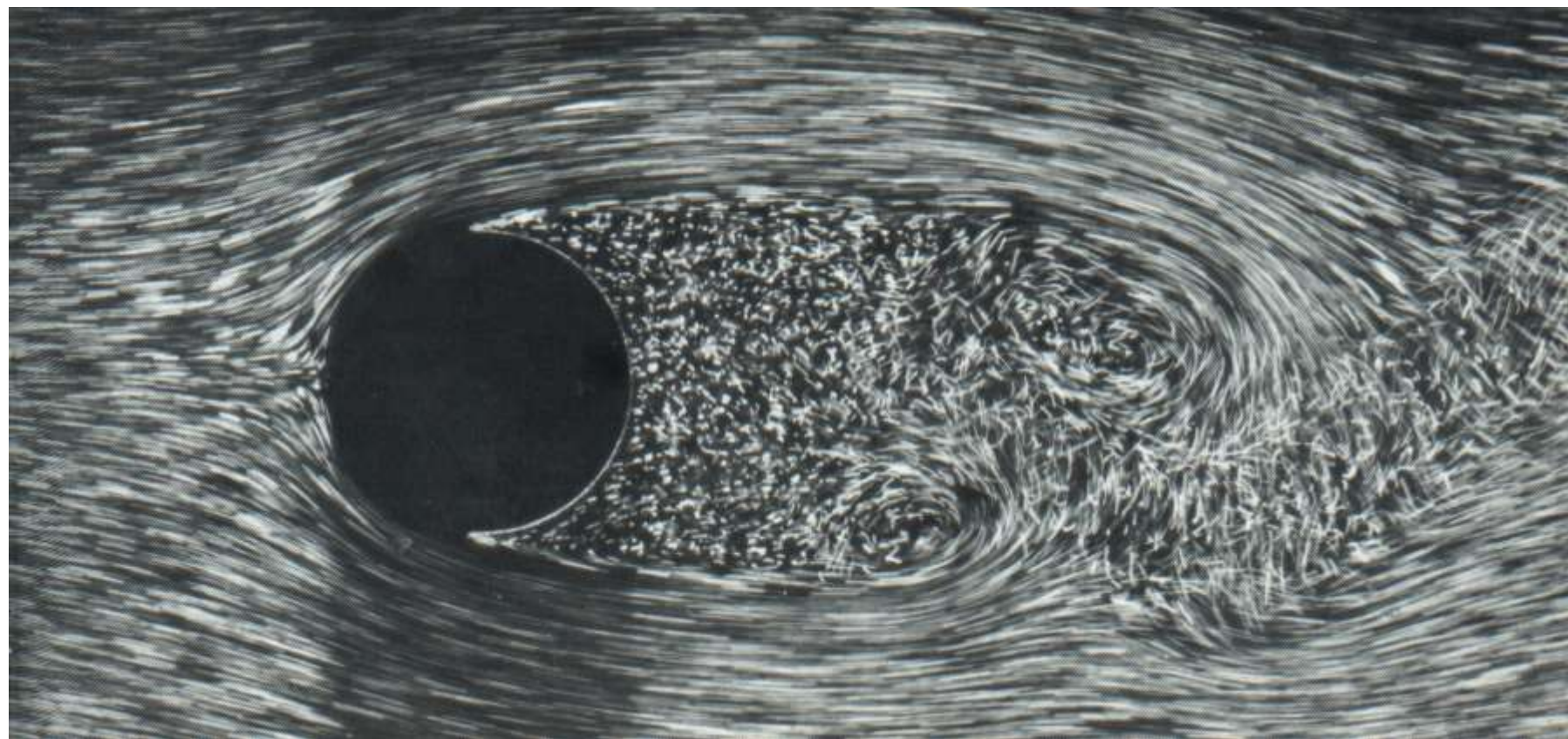
# Introdução

- Desenvolvimento da mecânica dos fluidos baseou-se - e ainda baseia-se- fortemente na visualização de escoamentos
  - Entendimento de fenômenos básicos
  - Orientação para medição quantitativa
  - Recentemente a visualização tornou-se uma técnica poderosa para análise quantitativa de escoamentos



Ilha da Madeira





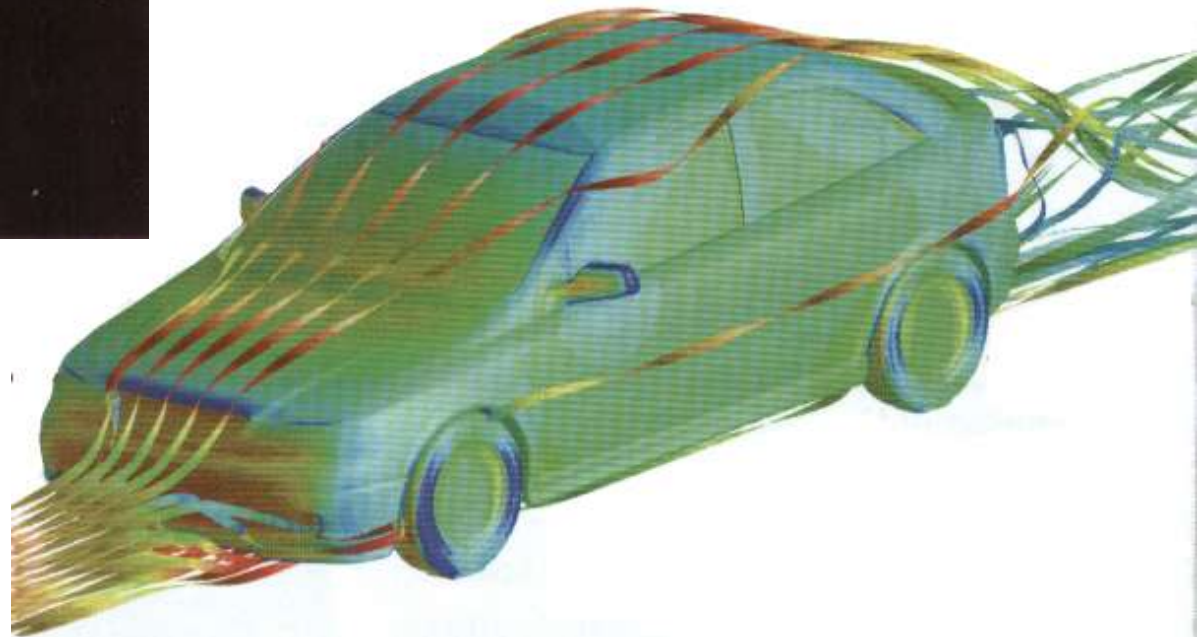
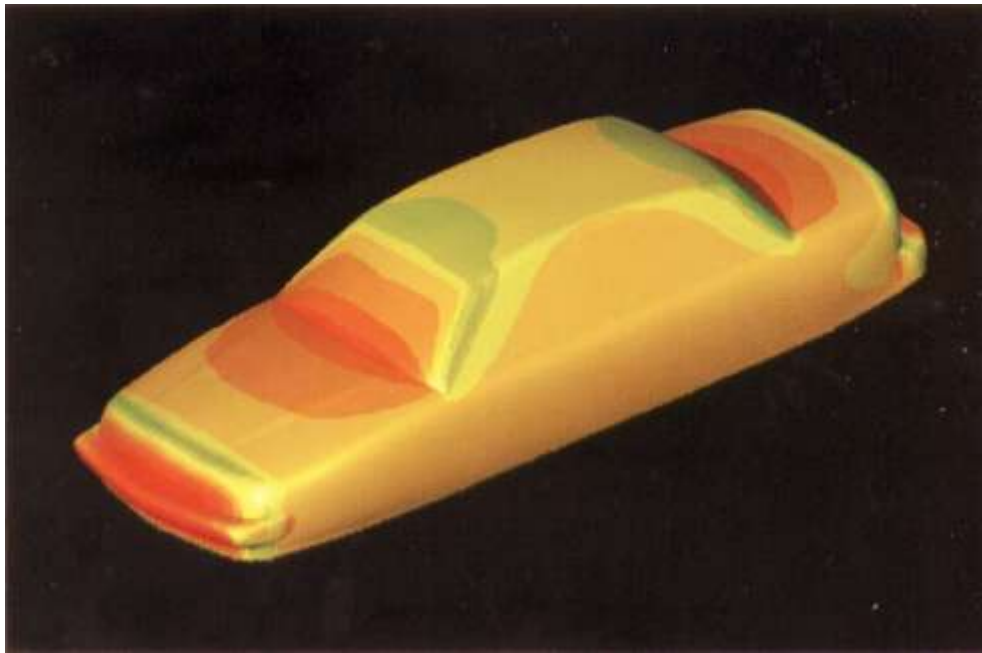


# Soluções Numéricas

- Equação de Navier-Stokes (~1850)
- Modelos de Turbulência
  - Média de Reynolds:  $\mathbf{U} = \mathbf{U}_m + \mathbf{u}'$
  - Modelos de média de Reynolds (RANS)
  - LES (Large Eddy Simulation)
  - DNS (Direct Numerical Simulation)

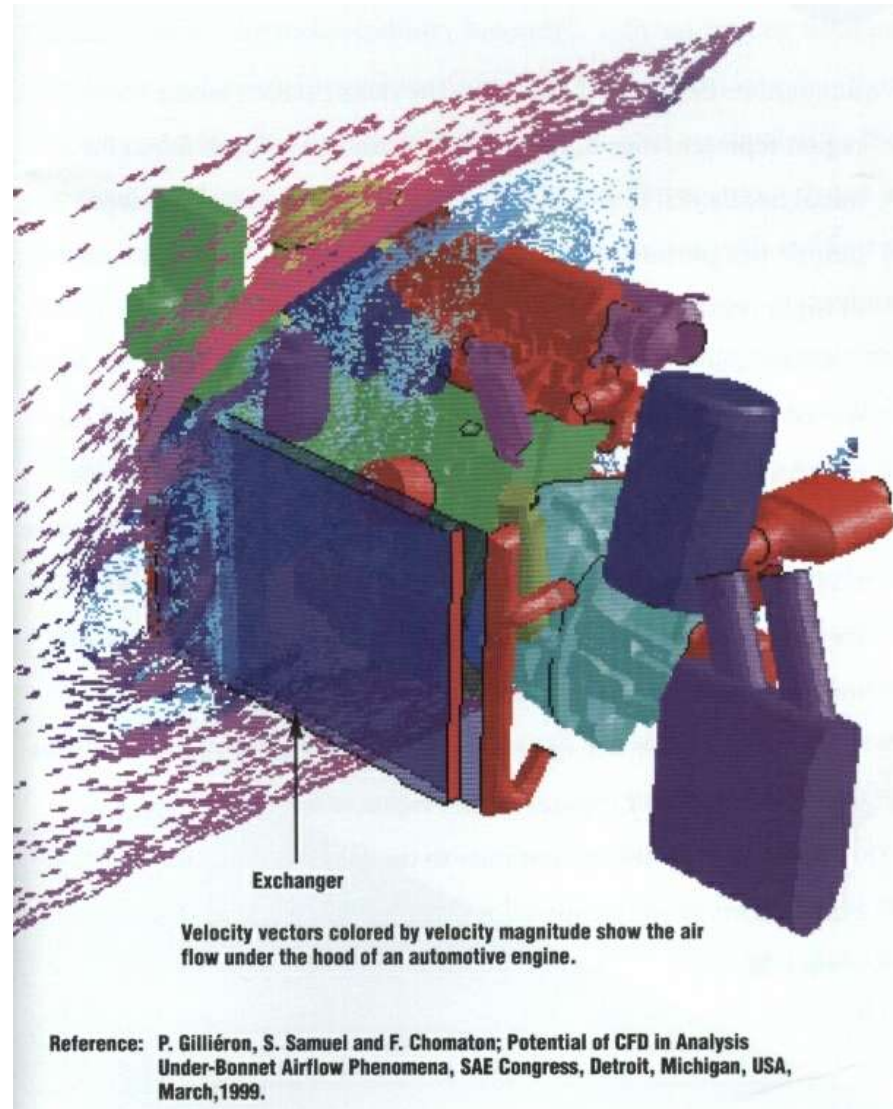
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{u}$$

# Aplicações na Indústria Automobilística



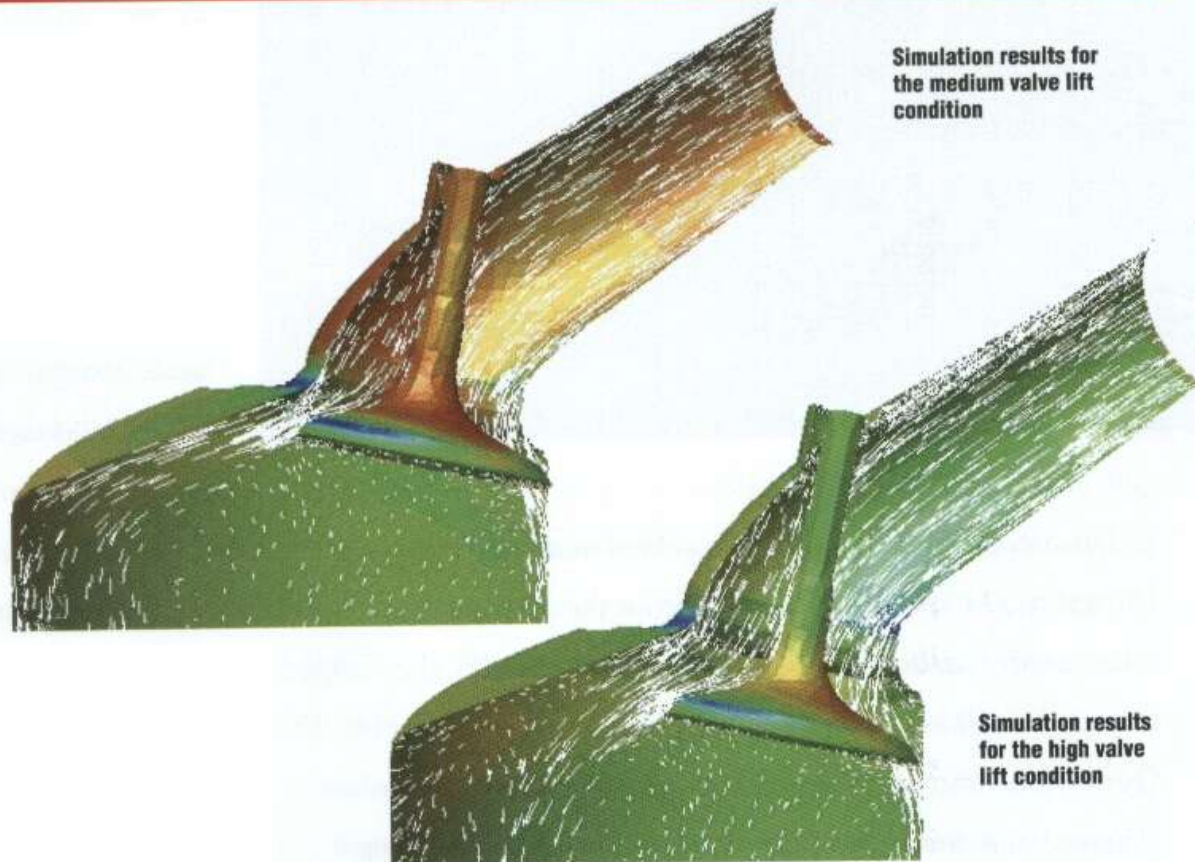


# Aplicações na Indústria Automobilística

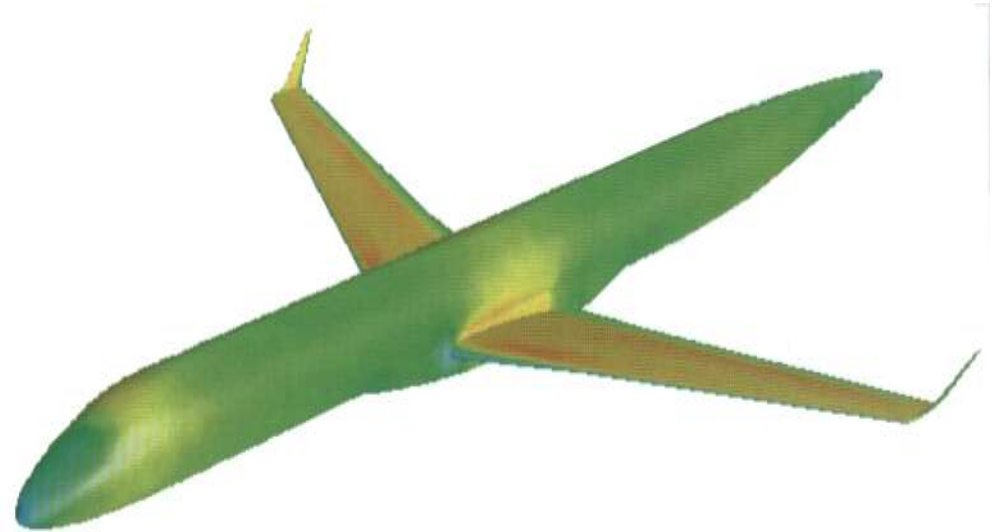
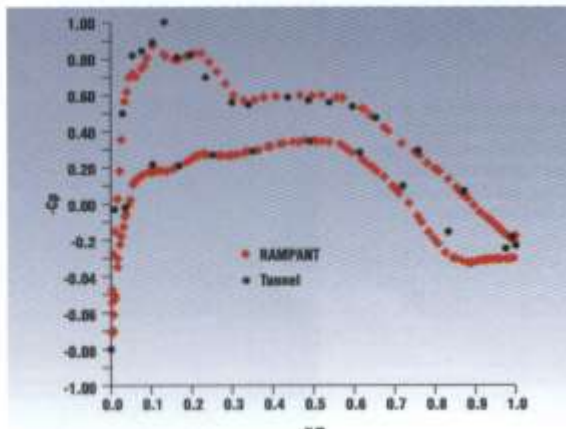
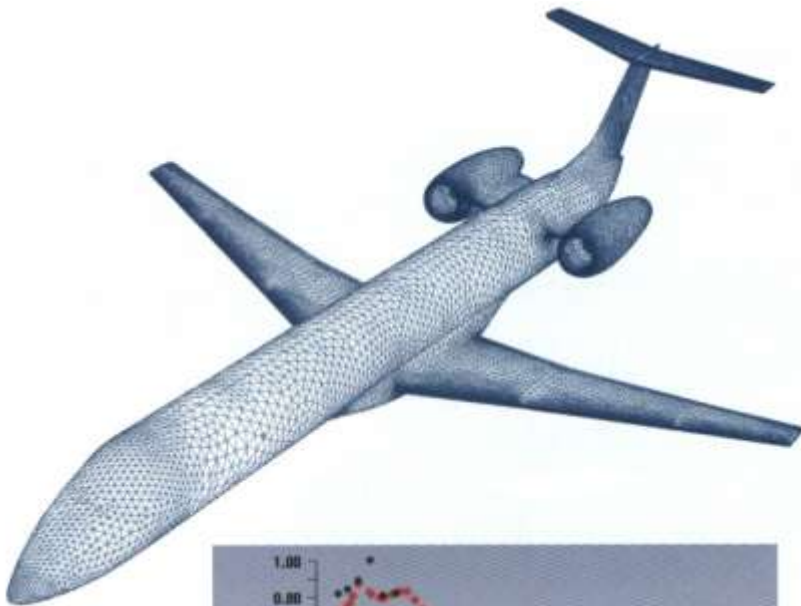


# Aplicações na Indústria Automobilística

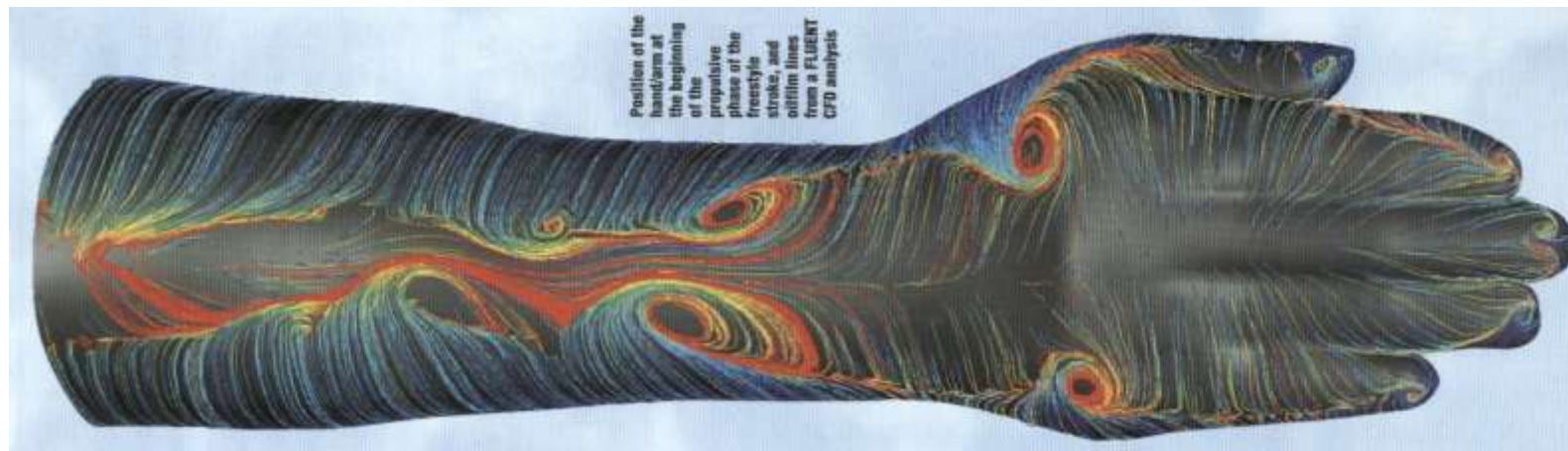
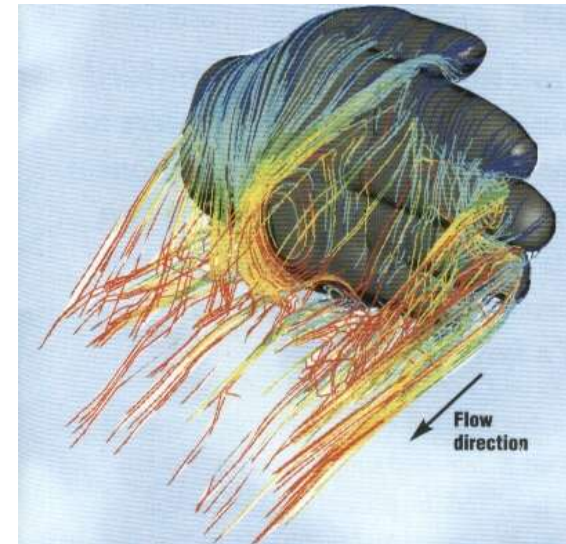
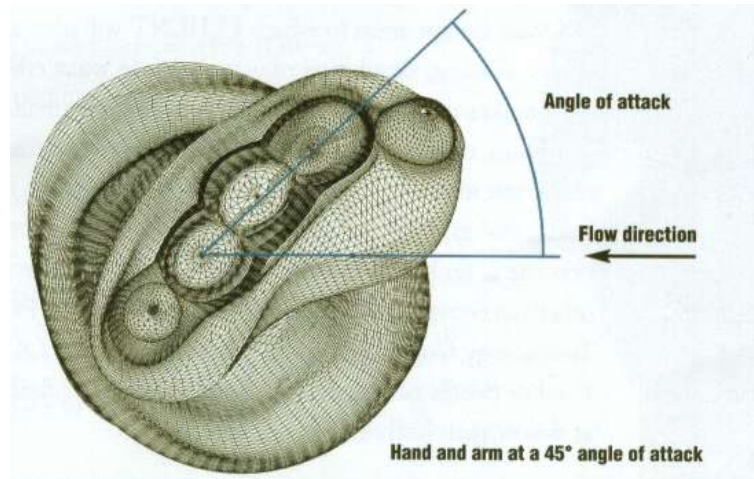
---



# Aplicações na Indústria Aeronáutica



# Aplicações em Esportes



# Commercial Code Solutions – Fluent

FEATURE: SPORTS



Flow patterns colored to total flow velocity around an elite male swimmer wearing a LZR RACER suit in the glide position.

Using the wealth of detailed fluid dynamics data from the CFD studies generated with software from ANSYS, Speedo researchers were able to guide the final design of the new suit — in particular, the precise location of the ultra-low-drag LZR panels, which were bonded onto the LZR RACER suit. In the end, the strategically placed LZR panels were found to reduce skin drag by a startling 24 percent in comparison to Speedo's previous FASTSKIN fabric.

Dr. Keith Hanna of ANSYS, who lectures on the application of CFD technology in sport, believes the scope for the application of CFD and simulation in general will only increase in the future. Hanna stated, "CFD is a powerful technology, and the accuracy of the results from this study have given Speedo confidence in the benefits of applying CFD in the design of future swimsuits. However, the big development in years to come could be the use of comprehensive multiphysics technology for elite swimsuit development — that is, the use of CFD with other physics such as structural simulation to actually simulate every aspect of real-world physics found in a competitive swimming scenario.

"The physics involved in simulating a moving swimmer are extremely complex, but the potential is there. Industries such as aerospace and automotive are increasingly turning to a multiphysics simulation solution as the only way of ensuring that all parameters are accounted for in their design process. In the instance of simulating performance in competitive swimming, a multiphysics approach would mean not only that CFD be used to analyze hydrodynamic flow and drag around a swimmer, but also that structural software be used to simulate how the suit itself may deform during a swimming stroke, for example, and how this affects drag." ■



Surface shear stress contours on an elite male athlete in the glide position.

In the first ten weeks following its launch in February, swimmers wearing the Speedo LZR RACER swimsuit set 35 world records.

6 ANSYS Advantage • Volume 4, Issue 2, 2008 [www.ansys.com](http://www.ansys.com)

FEATURE: SPORTS

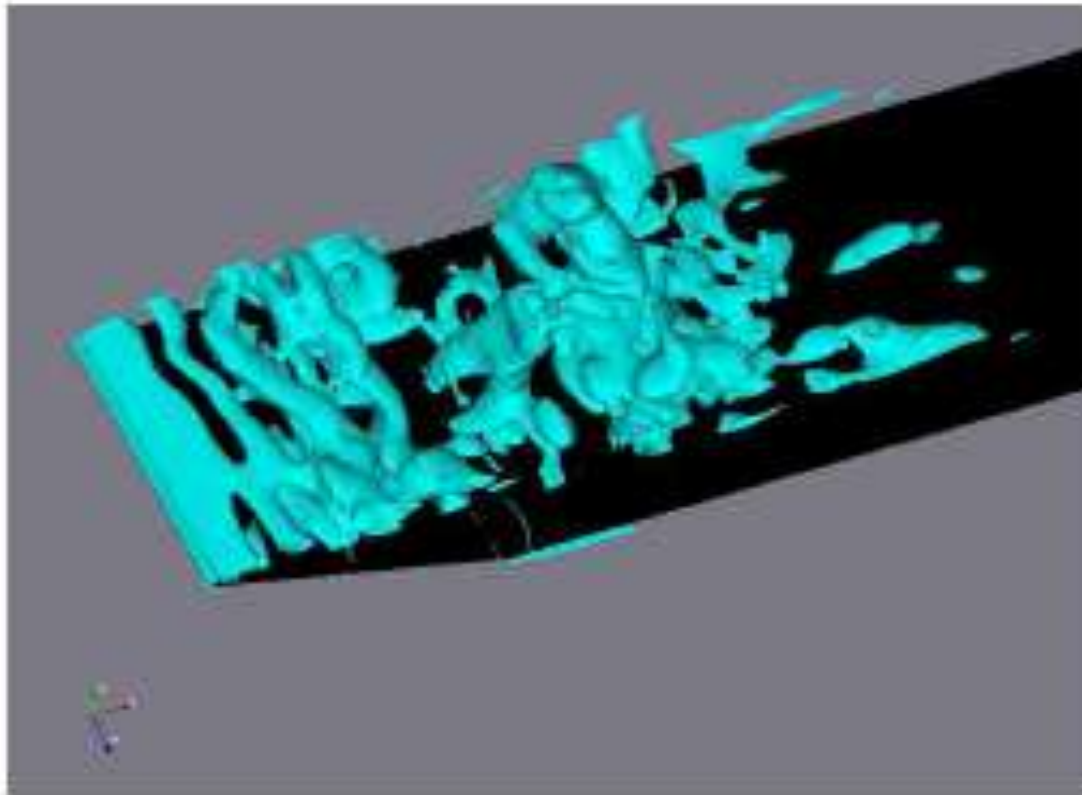


## Simulating Swimwear for Increased Speed

Speedo's new full-body swimsuit takes advantage of simulation technology in pursuit of gold medals and world records.

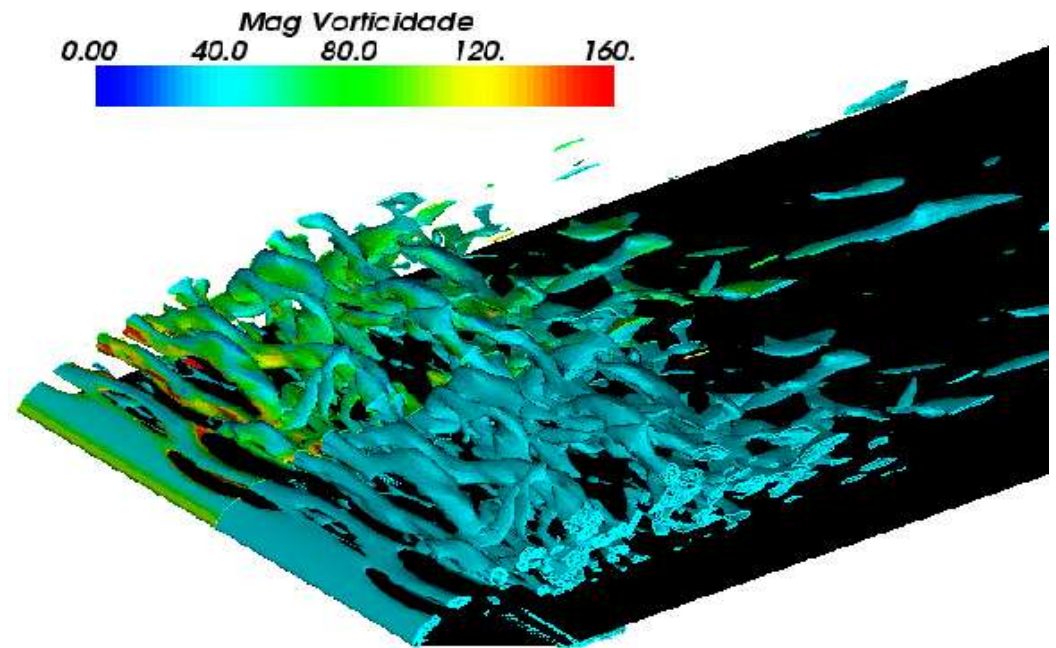
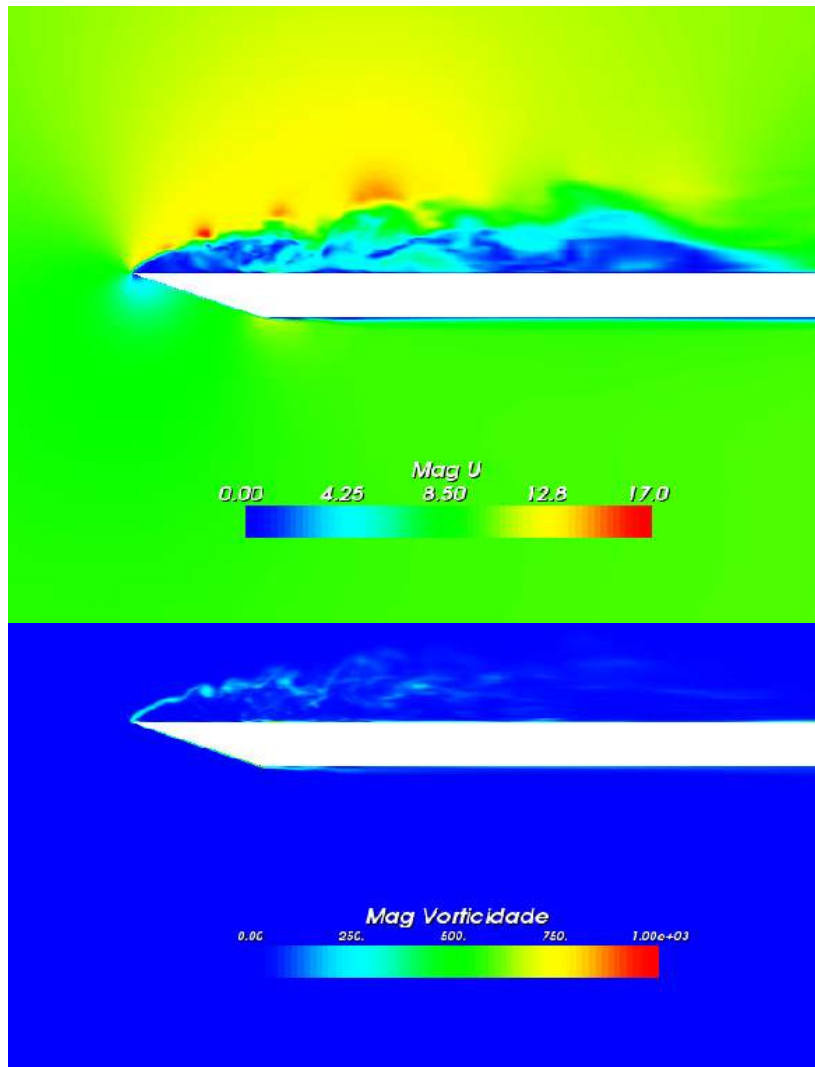
# Escoamento sobre placa plana - LES

- Sampaio and Nieckele



# Numerical Modeling

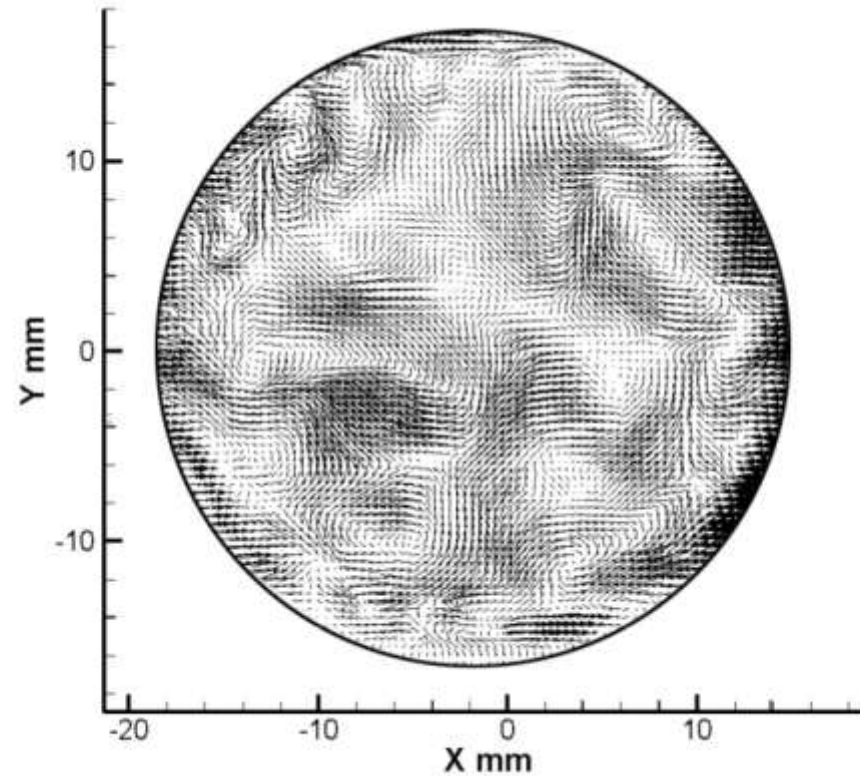
## U, vorticity and Q Contours



# Medida de Velocidade

- Instrumento ideal para estudo de escoamentos
  - medir campo 4- $D$ ,  $\vec{u} = \vec{u}(\vec{x}, t)$
  - função contínua da posição em todo o volume do escoamento
  - função contínua do tempo
- Medida de campo completo





Campo instantâneo na seção reta de um tubo com  $Re = 42.000$ .  
Cerca de 5.000 vetores representados na figura (Pereira, 2009)

# O que desejamos medir?

- Média temporal da velocidade
- Valor RMS das flutuações turbulentas
- Estatísticas de ordem superior
- Correlações no tempo e espaço

O que desejamos medir?

- Tensor gradiente de velocidade

$$\vec{\nabla} \vec{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

- Vorticidade

$$\vec{\nabla} \times \vec{u} = \left[ \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] \hat{e}_x + \left[ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] \hat{e}_y + \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \hat{e}_z$$

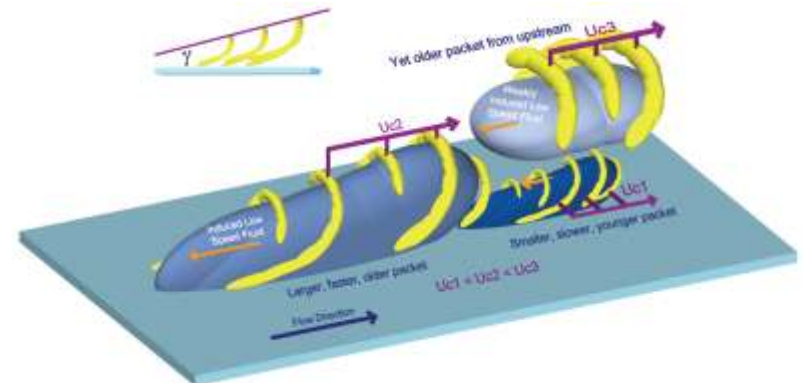
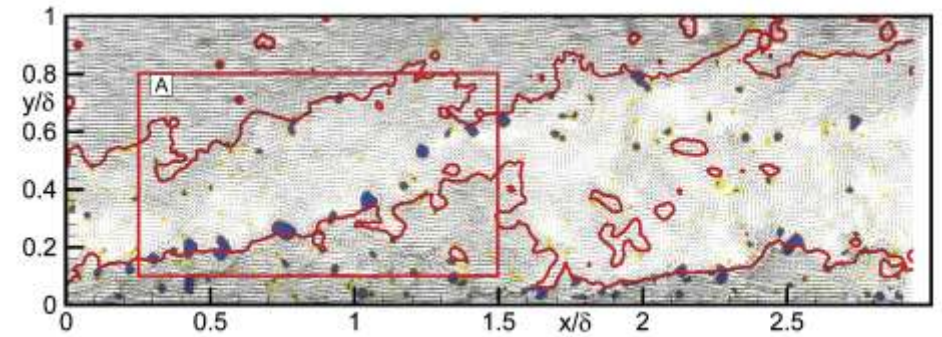
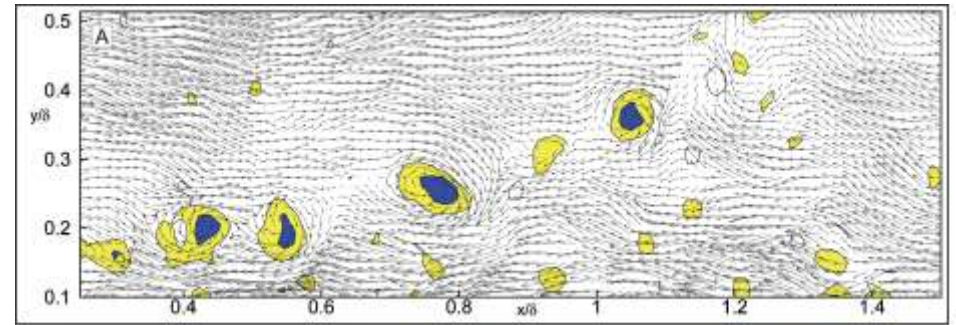
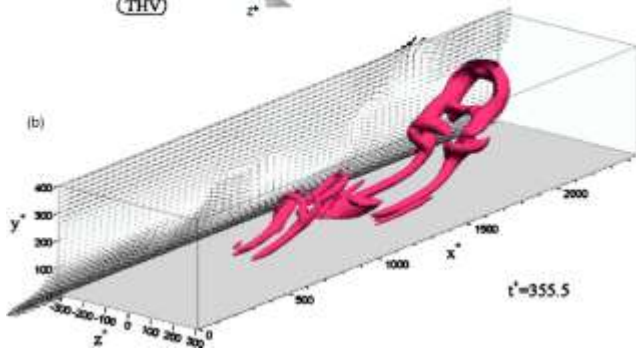
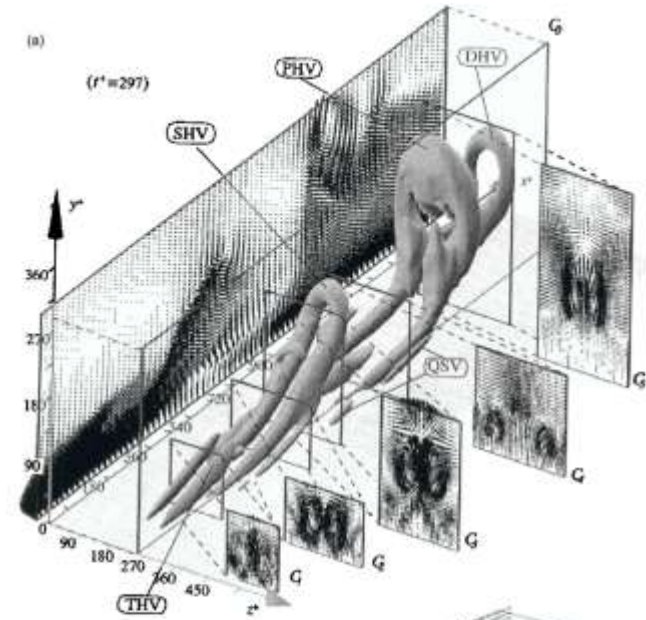
- Dissipação de energia cinética turbulenta

$$\varepsilon_k = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j}}$$

O que desejamos medir?

- Fluxos através de superfícies
- Circulação

- Estruturas coerentes



# Medida de Velocidade

- Equação de Navier-Stokes
  - requer informações instantâneas em múltiplos pontos
  - requer condições de contorno adequadas para simulação numérica

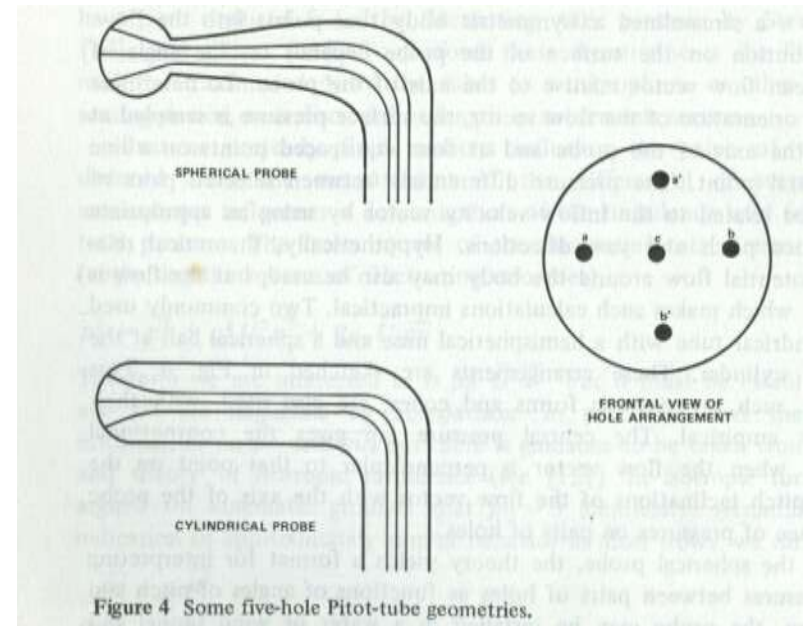
$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \nu \vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla} \vec{u}$$

# 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

# Tubo de Pitot

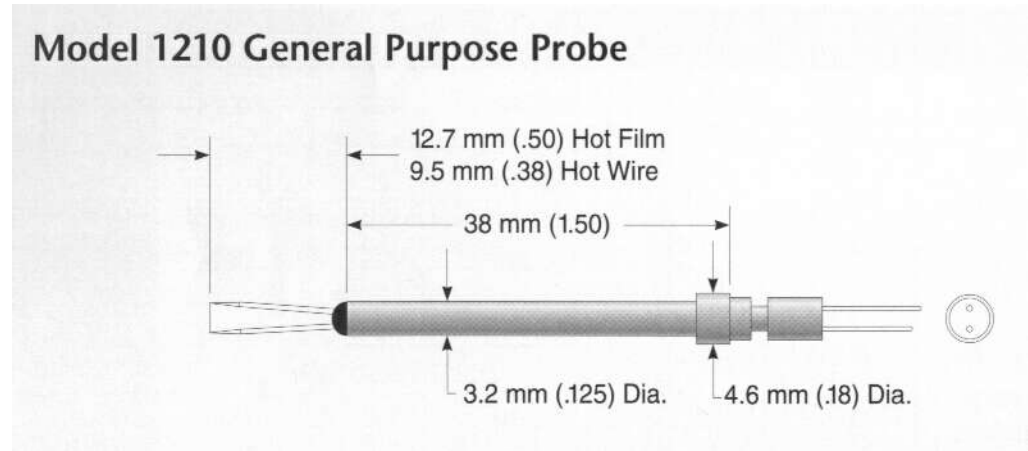
- Simples
- Baixo Custo
- Fácil utilização
- Moderada resposta freq.(transdutores de pressão)
- Faixa velocidade limitada
- Não mede reversão
- Perturba escoamento





# Anemômetro de Fio/Filme Quente (~1930)

- Melhor resposta frequência
- Tamanho: 2 mm x 5  $\mu\text{m}$
- Larga faixa veloc.
- Mede 3 componentes
- Boa exatidão
- Requer calibração
- Contaminação
- Quebra de sensores
- Perturba escoamento



# Anemômetro Laser-Doppler (~1970)

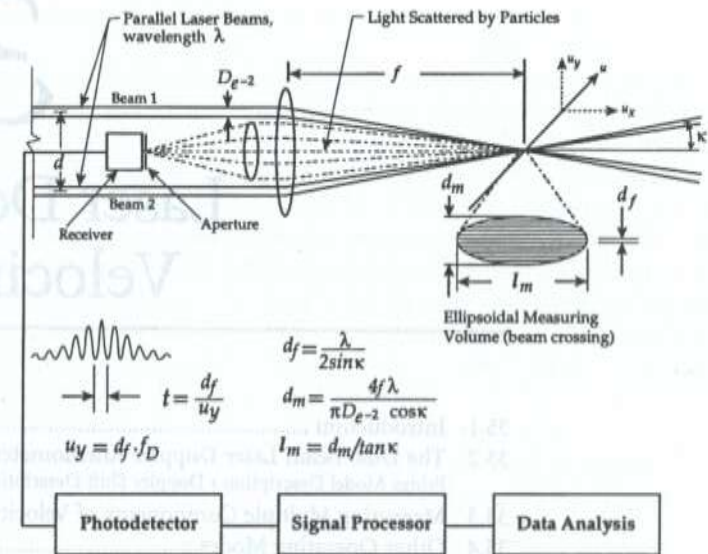
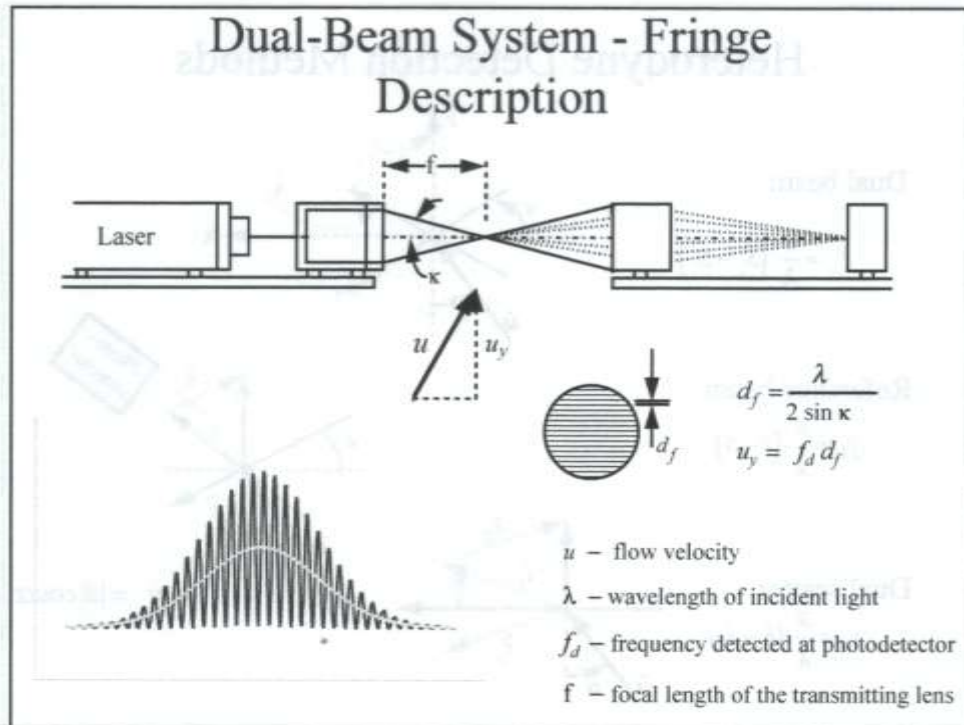
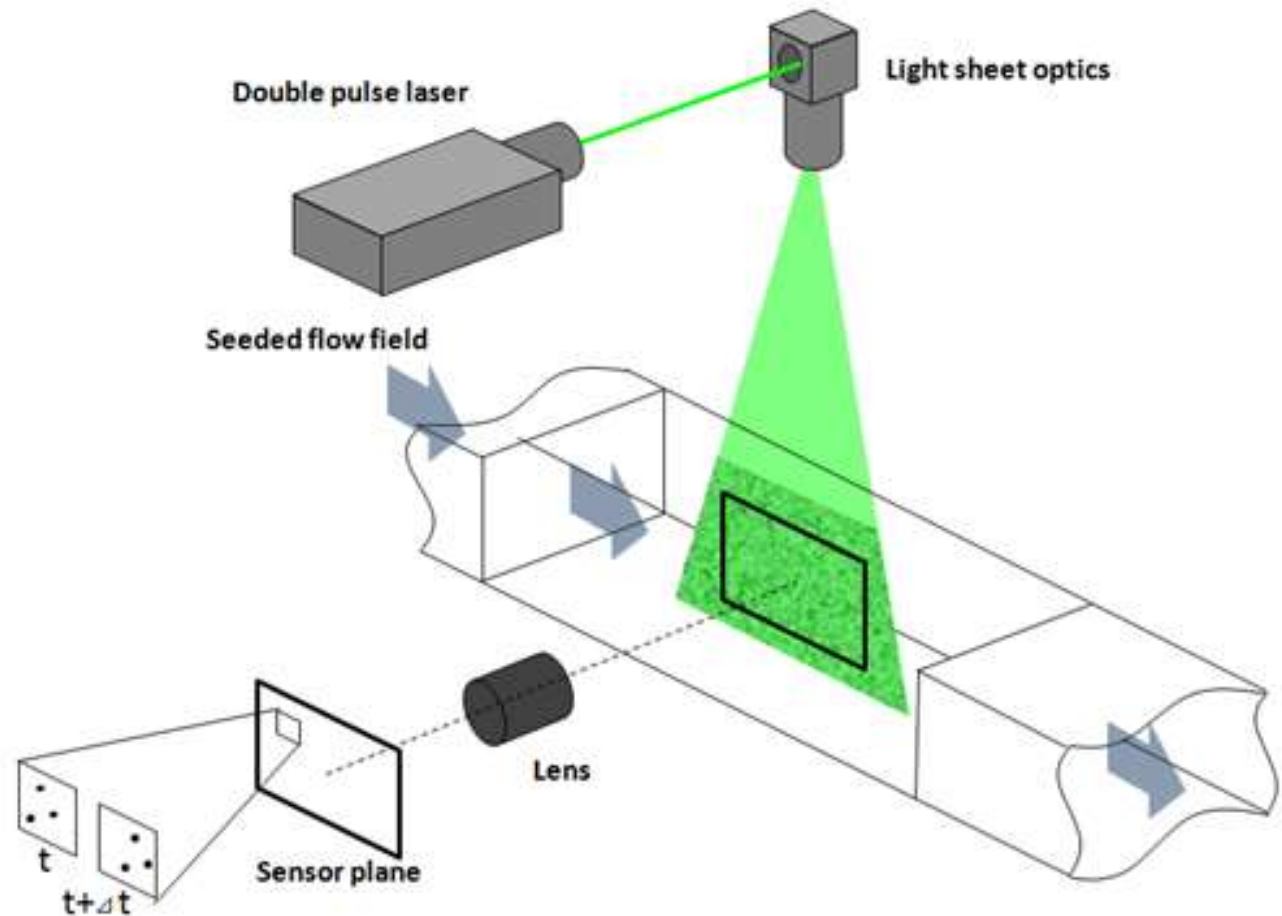


FIGURE 35.1 Schematic of a dual-beam arrangement.

# 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:  $\text{Ar}^+$  contínuo, Rubi, Vapor de cobre, Nd-YAG)
  - sistema de lentes para formação de plano de luz

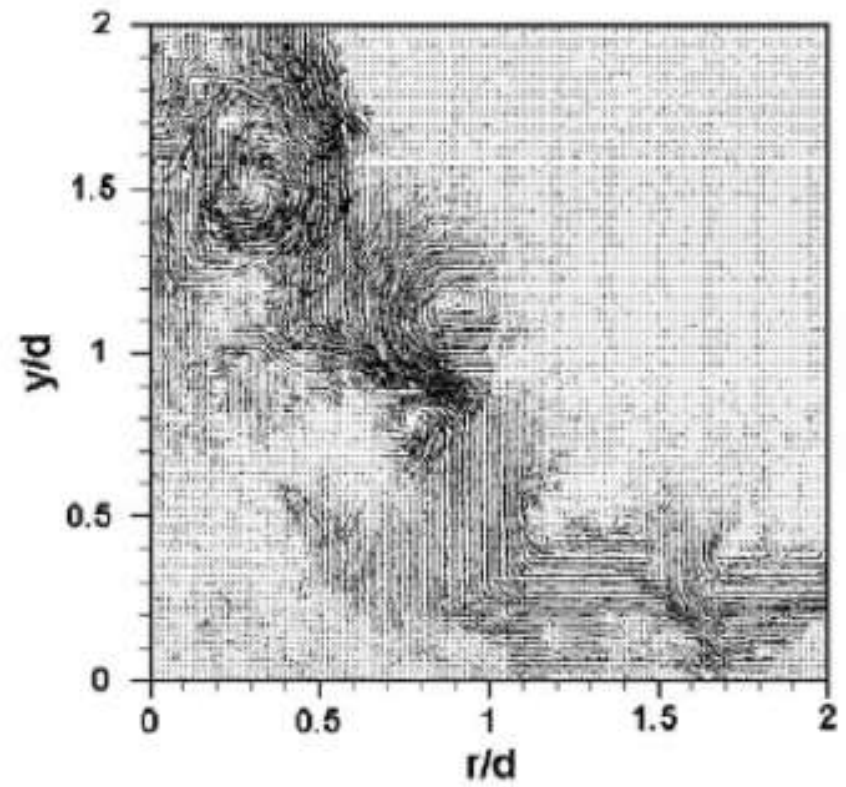
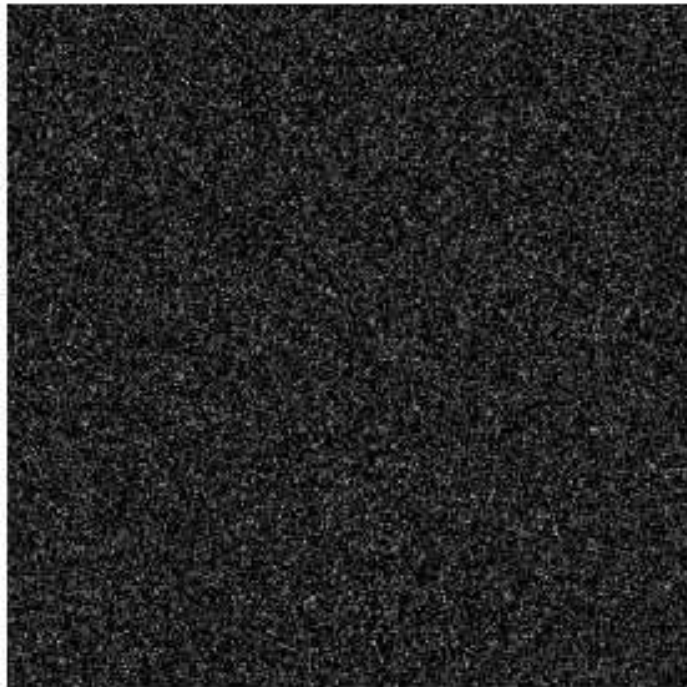
# DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- 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

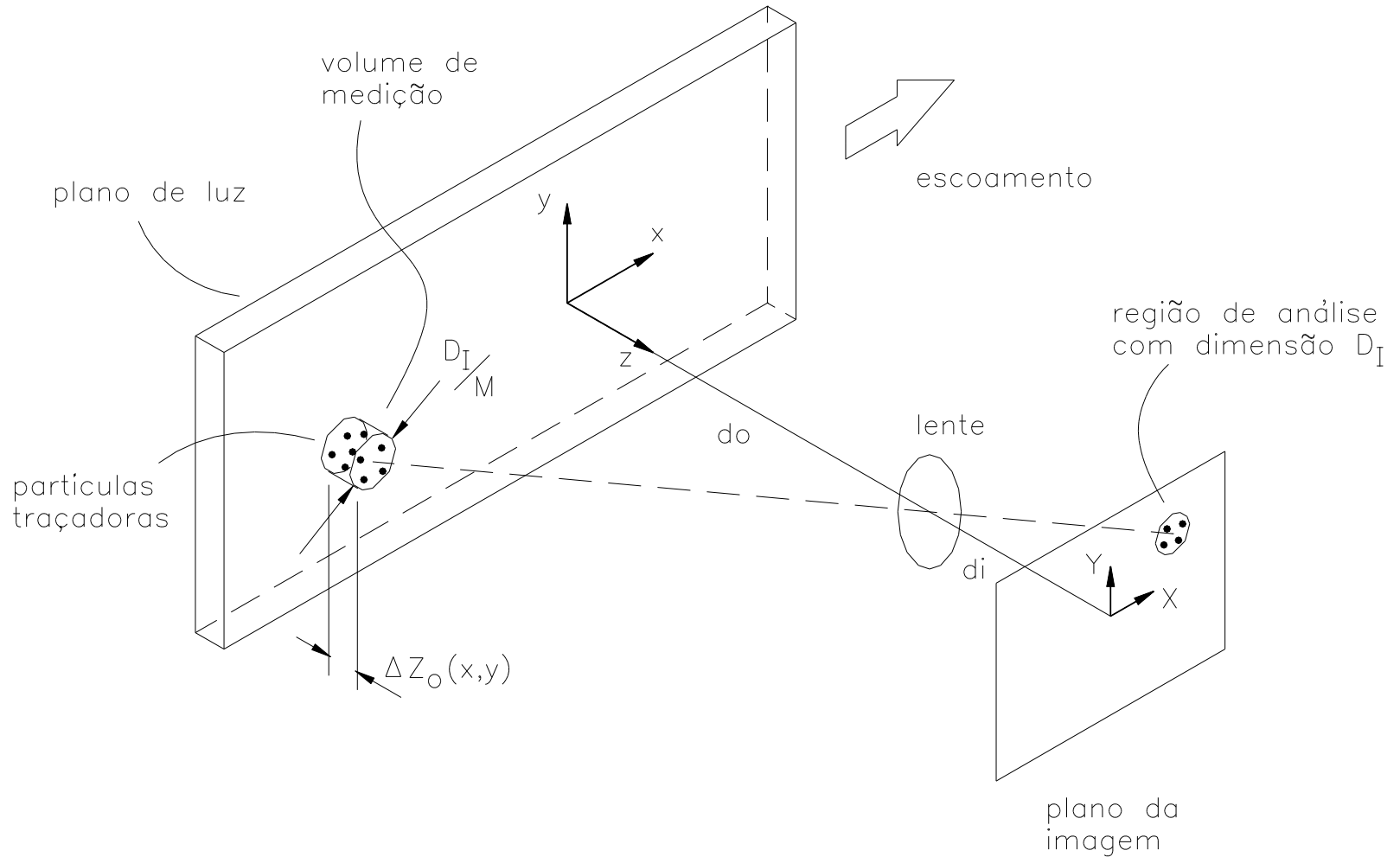
## DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- 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,  $100 \times 125$  mm =  $1.1 \times 10^9$  pixels)
- Software para Apresentação e Pós-processamento dos Resultados

# Medição X Visualização



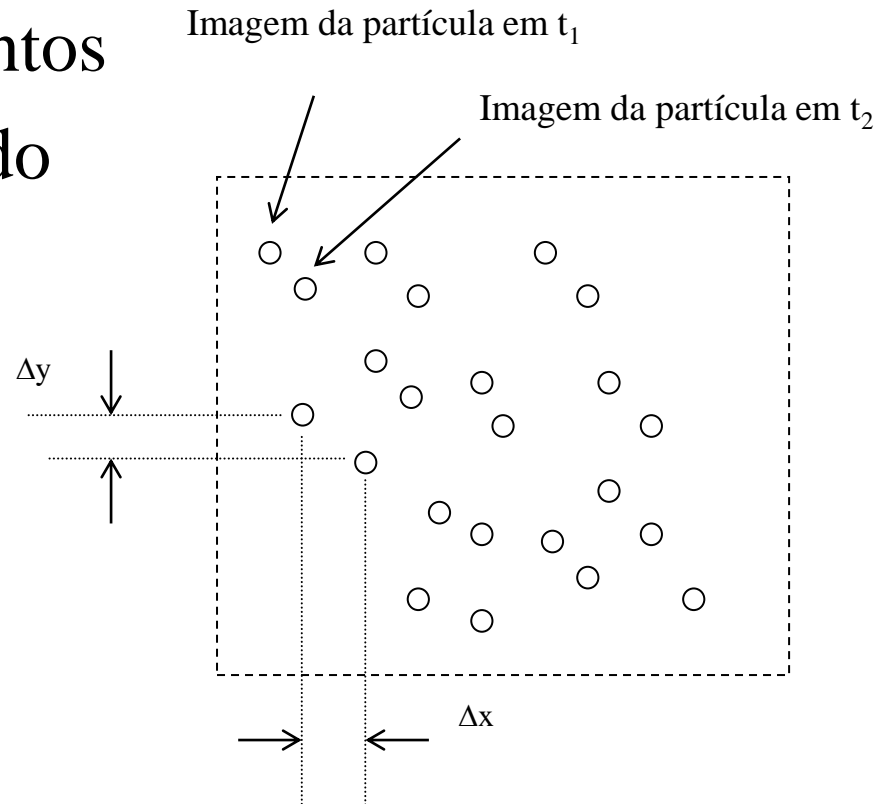
# DESCRIÇÃO DA TÉCNICA





# DESCRIÇÃO DA TÉCNICA

- Pequenos deslocamentos
- $\Delta t$  pequeno comparado com escalas do escoamento
- Análise manual das imagens
- análise automática



# MODOS DE OPERAÇÃO

## VELOCIMETRIA DE LUZ PULSADA

- Para concentração de partículas:
  - define-se densidade de imagem,  $N_I$  :

$$N_I = C_P A_I \frac{\Delta Z_0}{M^2}$$

Onde:

$A_I$  é a área da janela de interrogação;

$C_P$  é o número de partículas por unidade de volume;

$\Delta Z_0$  é a espessura do plano de luz;

$M$  é a magnificação.

# 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)

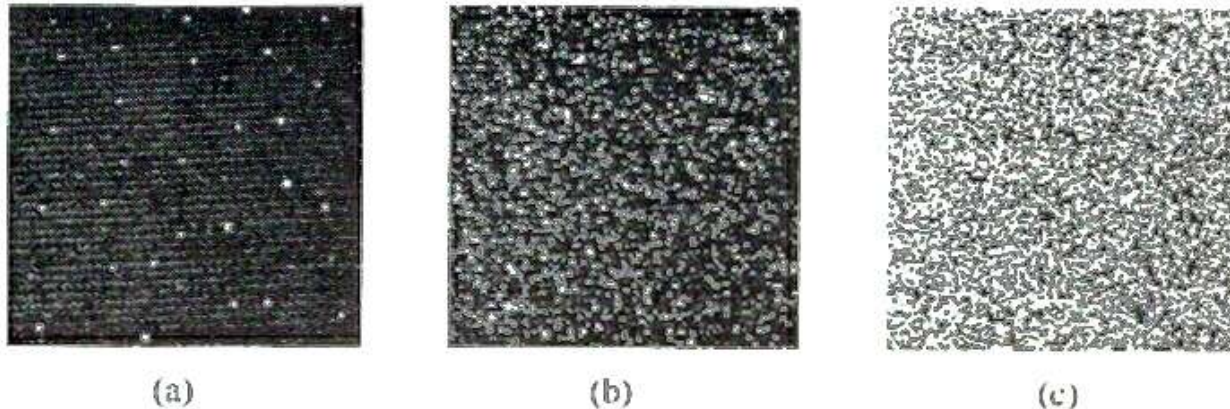


Fig. 1.5. The three modes of particle image density: (a) low (PTV), (b) medium (PIV), and (c) high image density (LSV).

# RESOLUÇÃO ESPACIAL E INCERTEZA

- Resolução Espacial
  - maior deslocamento espacial das partículas,  $\Delta x_{max}$ , 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)

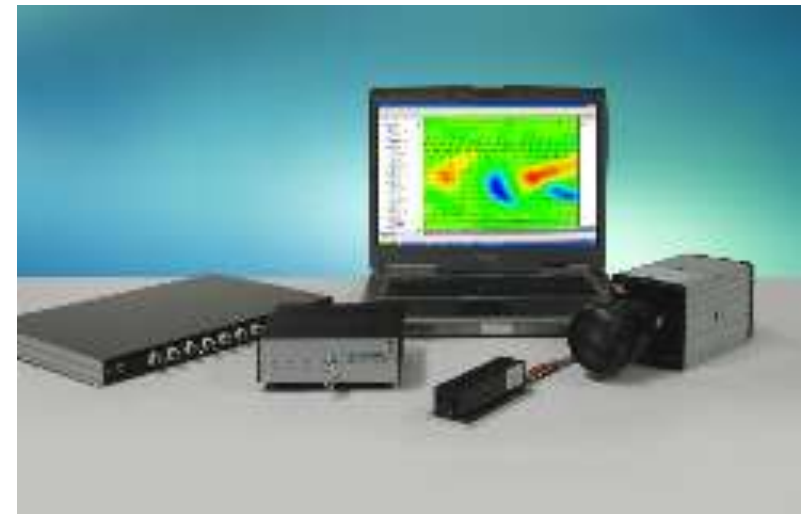
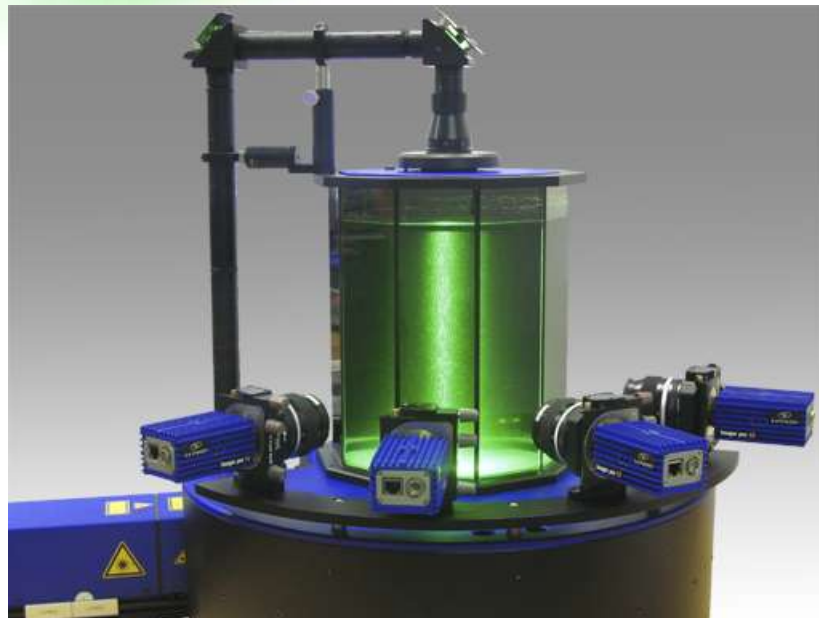
# RESOLUÇÃO ESPACIAL E INCERTEZA

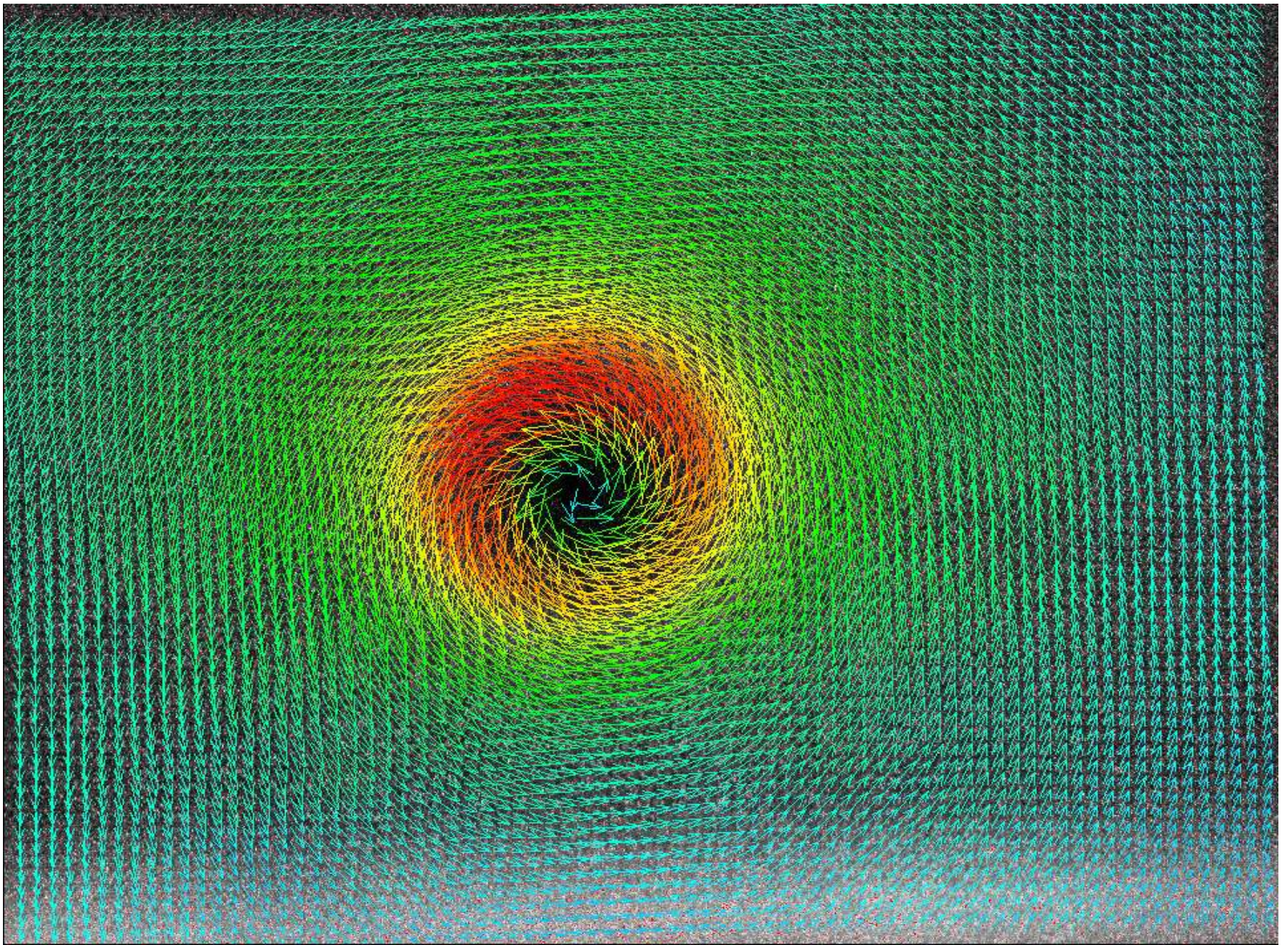
$$\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_{\Delta x}}{\Delta x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\Delta t}}{\Delta t}\right)^2$$

$\sigma_{\Delta t}$  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

Lei de Stokes,  $p/ \text{Re}_p < 0,4$

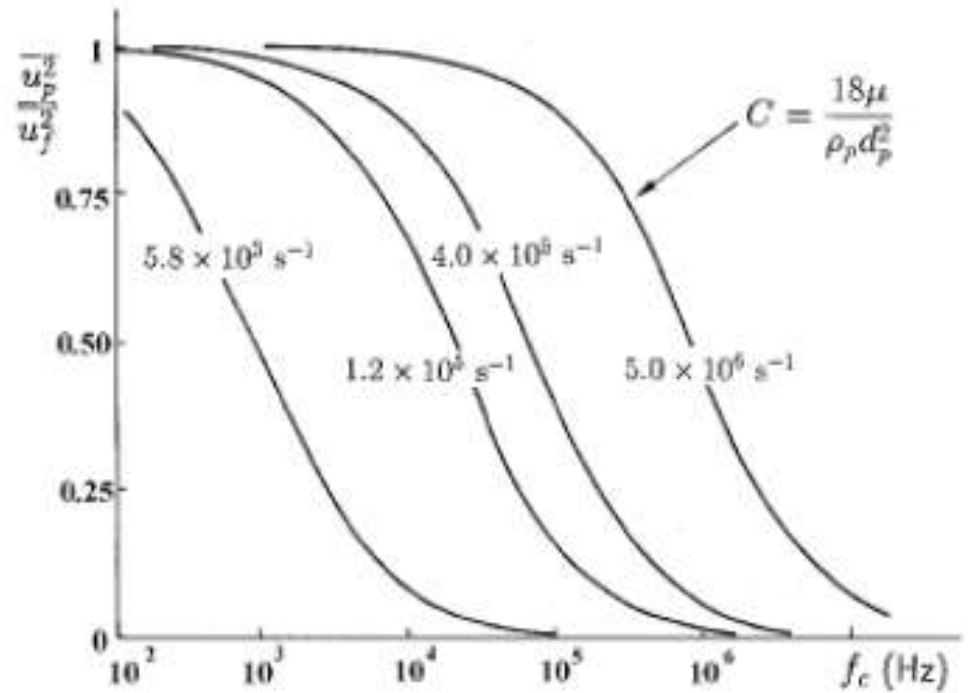
$$(U_f - U_P) = \frac{1}{18} \frac{d_p^2 g(\rho_p - \rho_f)}{\mu_f}$$

A resposta da partícula segue uma lei exponencial:  $U_P(t) = \vec{U} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_P}\right) \right]$

O tempo de resposta é dado por:  $\tau_P = d_p^2 \frac{\rho_P}{18\mu_f}$

Assim, pode-se definir o número de Stokes da partícula como sendo:  $St = \frac{\tau_P}{\tau_f}$

Se  $St \rightarrow 0$ , as partículas seguem perfeitamente o escoamento. ( $d_p \rightarrow 0$ )



# PIV - CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS

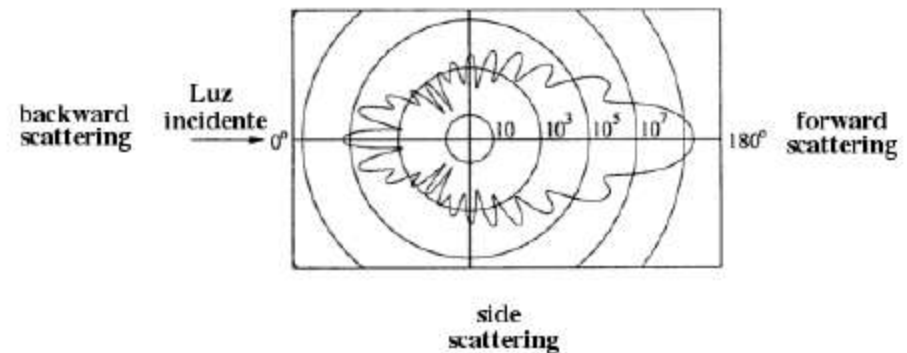
- Partículas

- Devem espalhar luz suficiente para o registro da imagem

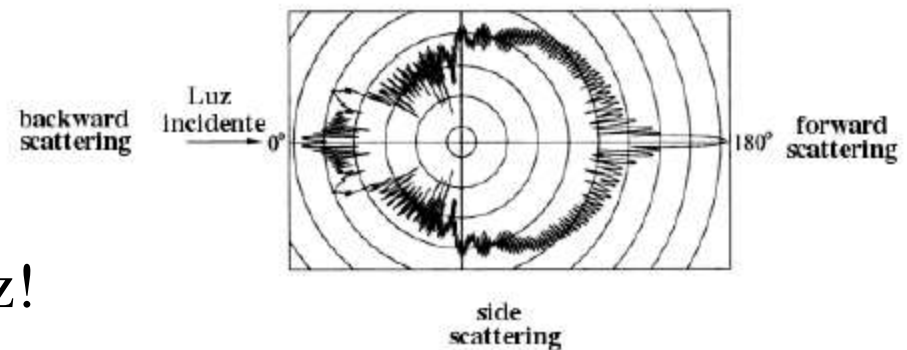
- Espalhamento de luz (Teoria de Mie)

- Tamanho da partícula
- Razão dos índices de refração partícula/fluido
- Forma
- Orientação
- Ângulo de observação

- Grandes diâmetros espalham mais luz!



(a)



# Partículas

- Partículas para escoamento de líquidos  
(tamanho típico: 10 - 30  $\mu\text{m}$ )

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

# Partículas

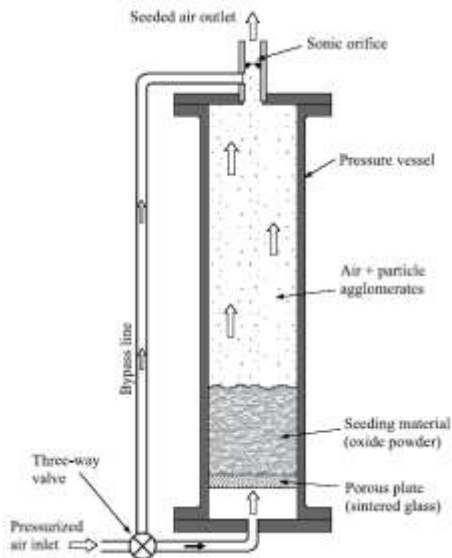
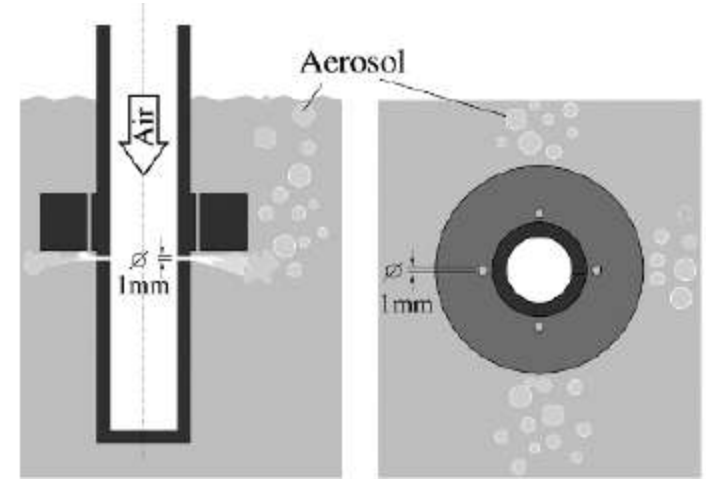
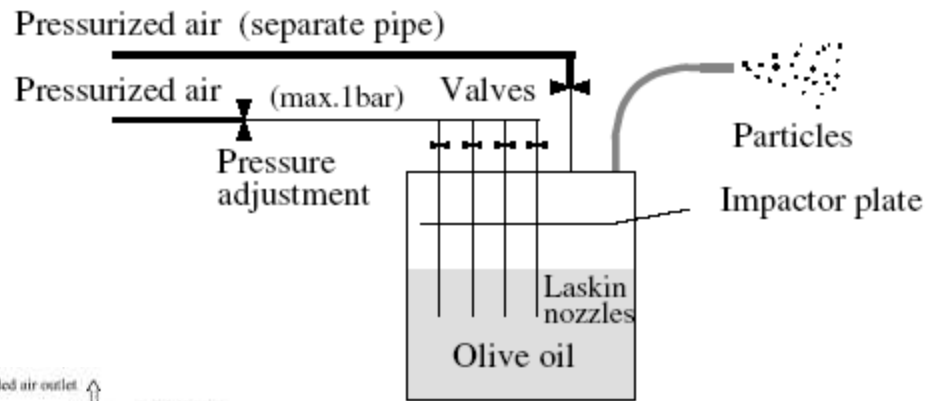
- Partículas para escoamento de gases  
(tamanho típico 1 - 5  $\mu\text{m}$ )

<b>Tipo</b>	<b>Material</b>	<b>Diâmetro médio, <math>\mu\text{m}</math></b>
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

# Partículas

- Geradores de partículas líquidas para escoamentos de gases



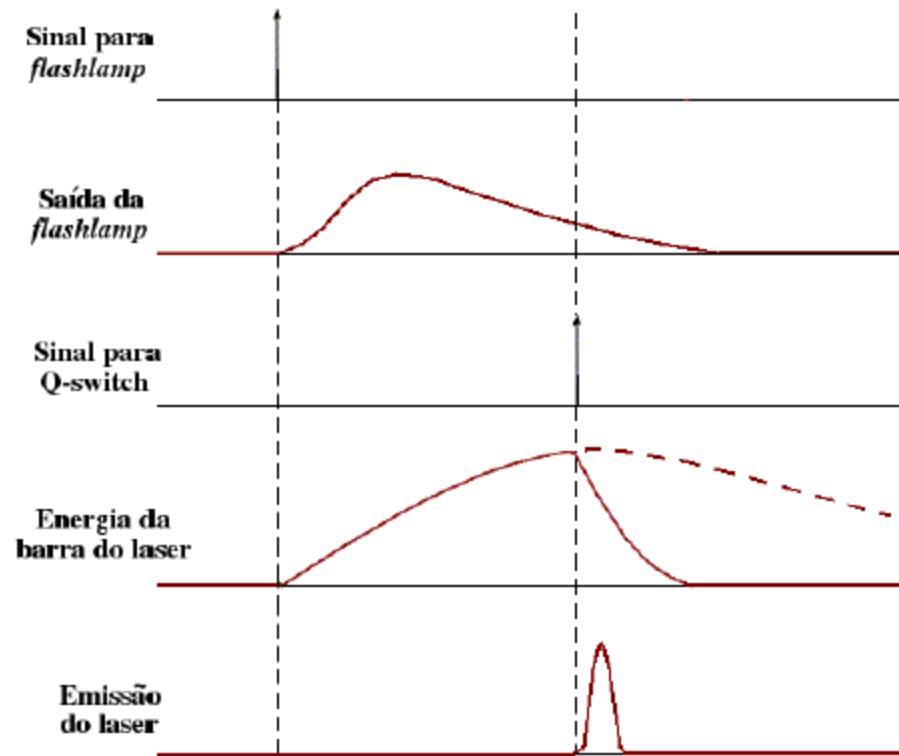
# Iluminação

- Lasers

Tipo	$\lambda$ [nm]	Energia por pulso [mJ]	Taxa de repetição [Hz]	Tempo mínimo entre pulsos [ $\mu$ s]	Duração do pulso [ $\mu$ s]
Vapor cobre	510 / 578	8	5000 a 10000	100	0.030
Ar <sup>+</sup> 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

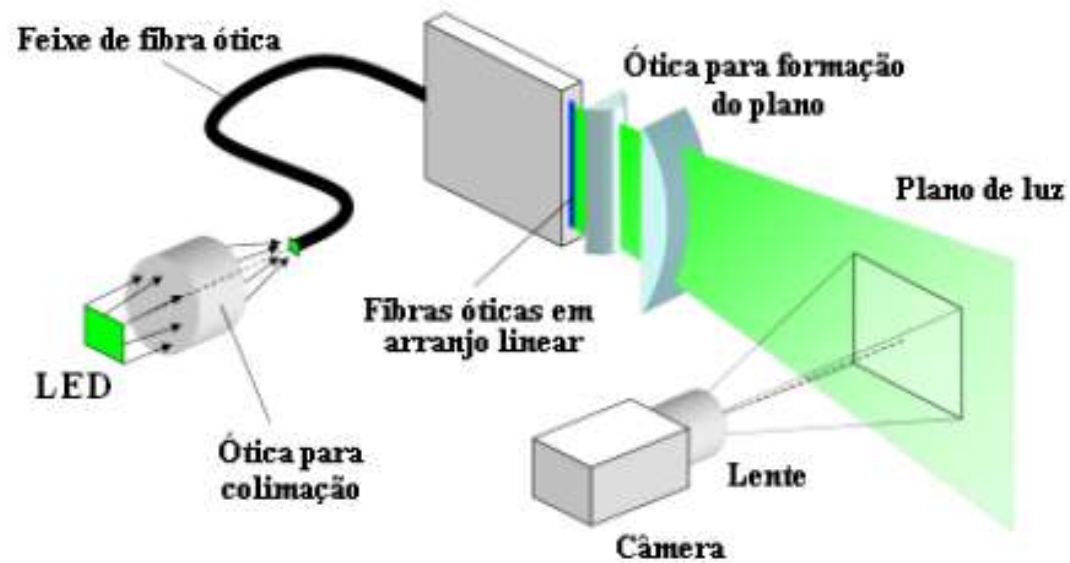
# Iluminação

- Lasers: Q-switching



# Iluminação

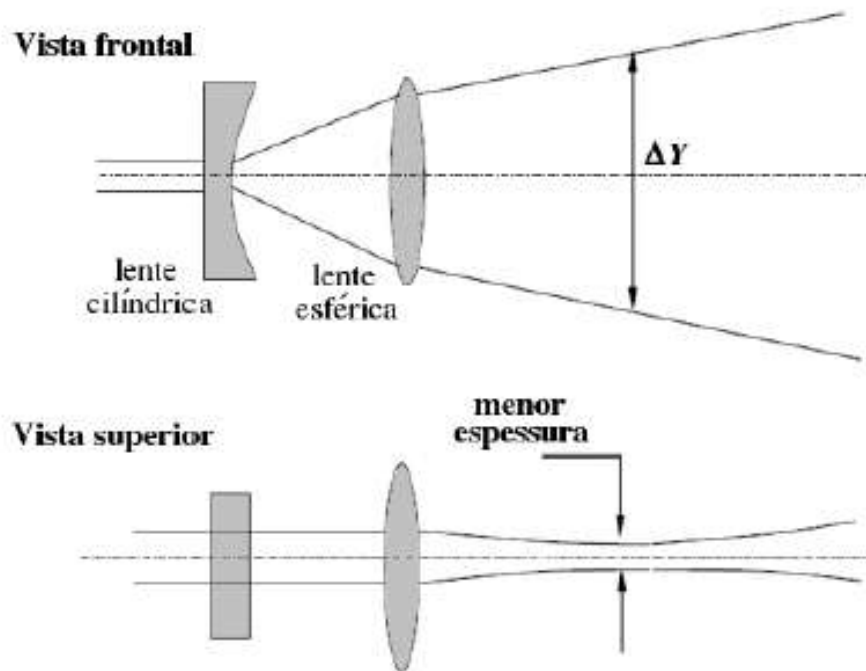
- LED's





# Iluminação

- Formação do plano de luz

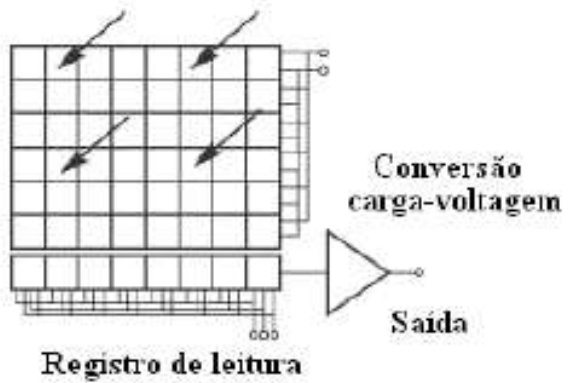


# Registro das Imagens

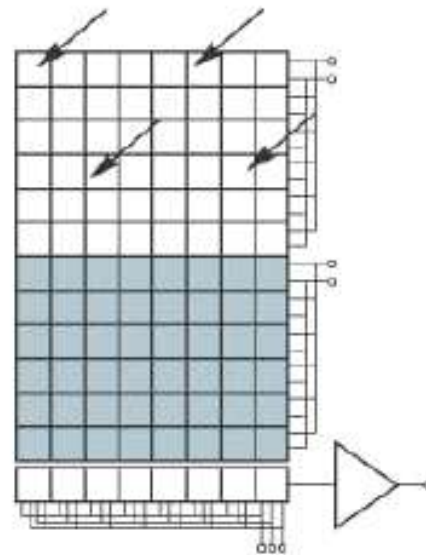
- CCD (charged couple device)
  - matriz de sensores  $10 \times 10 \mu\text{m}^2$  ou 100 pixels/mm
  - Tamanhos típicos usados em PIV: 650 x 480, 1000 x 1000, 4000 x 4000 pixels
  - Tipos de sensores CCD:
    - Full frame,
    - Frame transfer
    - Progressive scan Interline transfer (com micro lentes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

# Câmeras

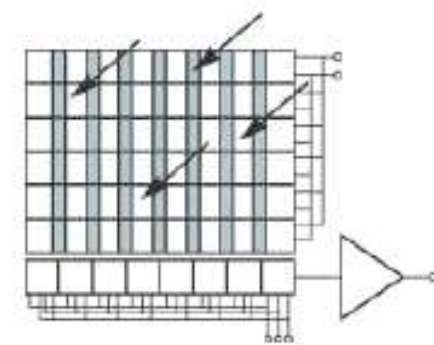
(a)



(b)



(c)



# Registro das Imagens

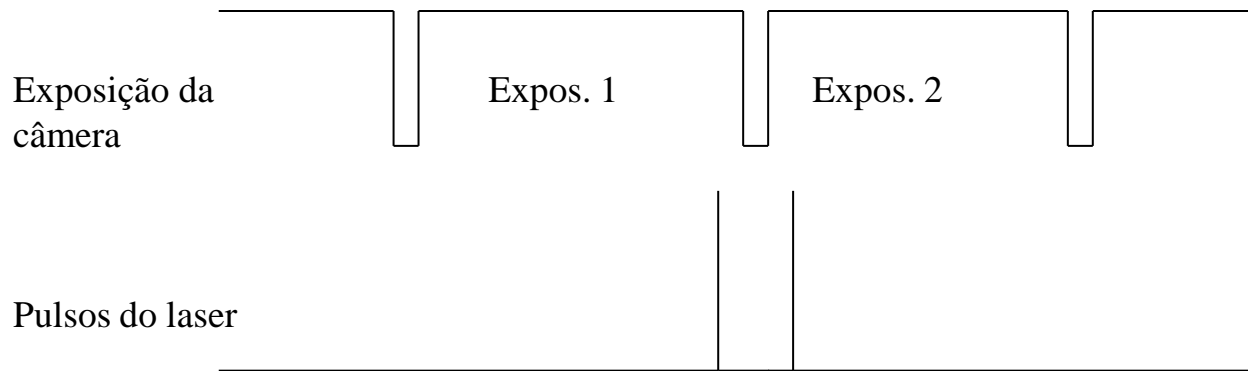
- Sensores CMOS (complementary metal oxide semiconductor)
  - matriz de sensores  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$
  - Menos sensíveis à luz
  - Acesso individual a cada pixel
  - Funções integradas no chip: amplificação, transformações não lineares
  - Número de pixels ativos selecionado: sub-domínios ativos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



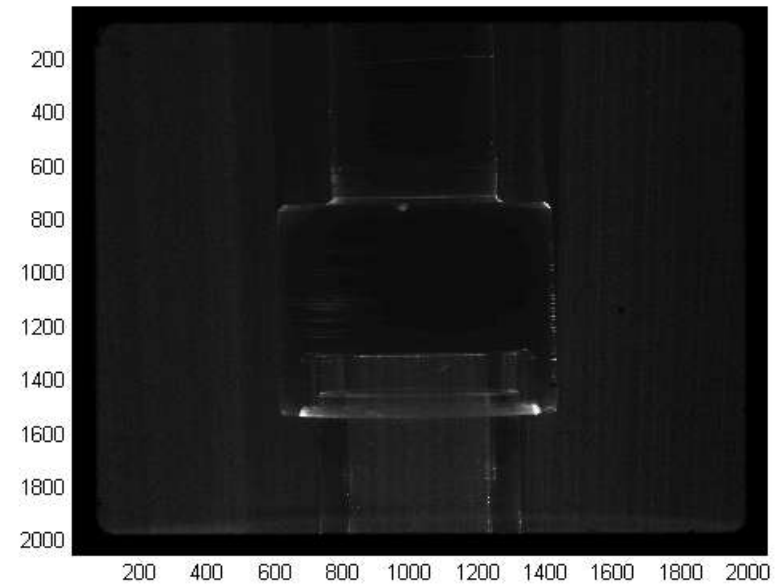
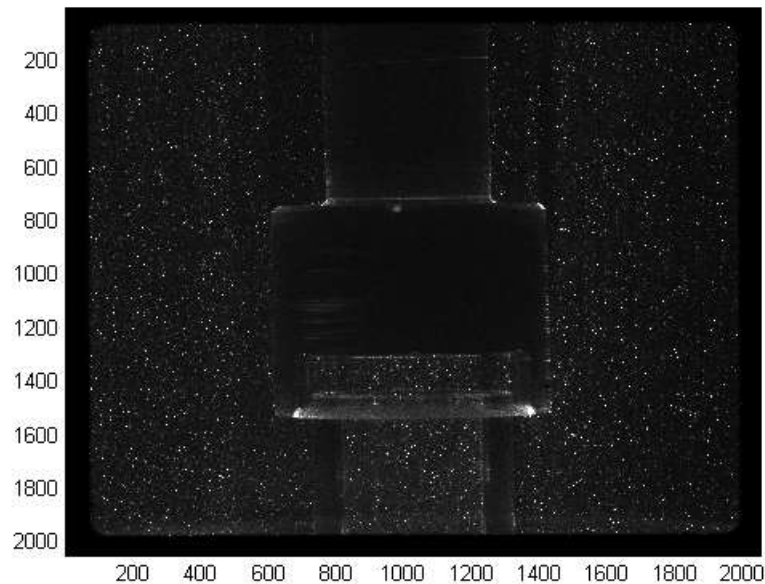
# Pré-processamento das imagens

- Todo esforço deve ser feito para obter imagens de boa qualidade
- Objetivos do pré-processamento:
  - Aumentar e uniformizar a intensidade das imagens de partículas
  - Diminuir a influência de outros objetos presentes
- Técnicas utilizadas:
  - Subtração de iluminação de fundo
  - Filtros passa-alta ou passa-faixa
  - Normalização por janelas locais
  - Equalização de intensidades

# Pré-processamento das imagens

– Técnicas utilizadas:

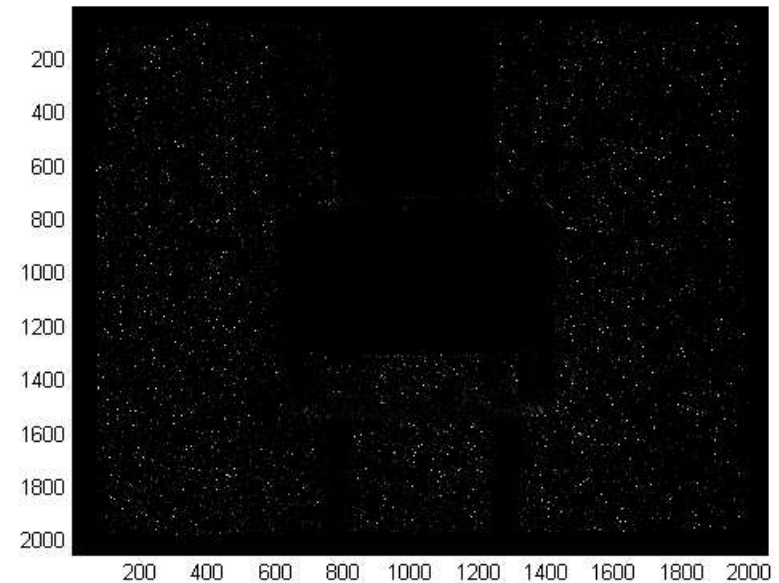
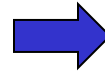
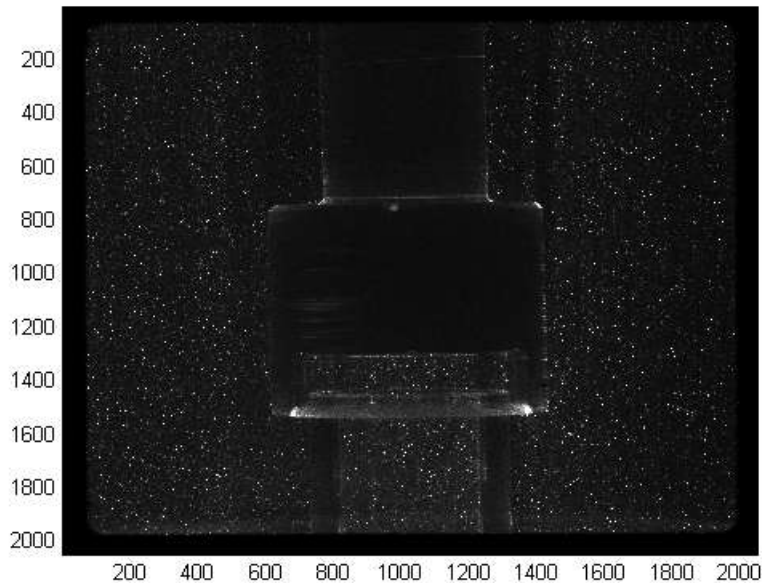
- Subtração de iluminação de fundo



# Pré-processamento das imagens

– Técnicas utilizadas:

- Subtração de iluminação de fundo

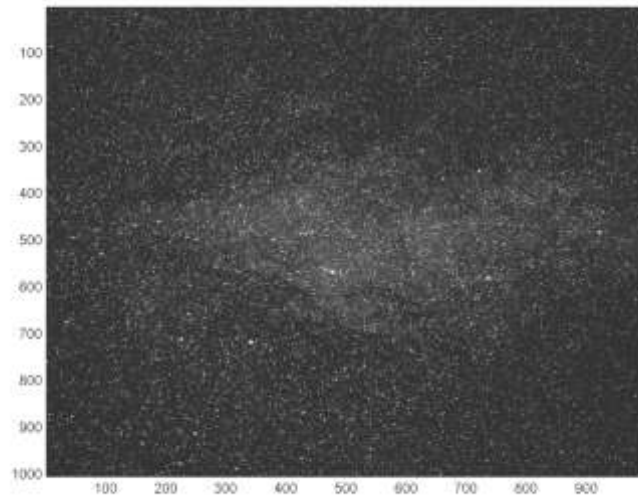




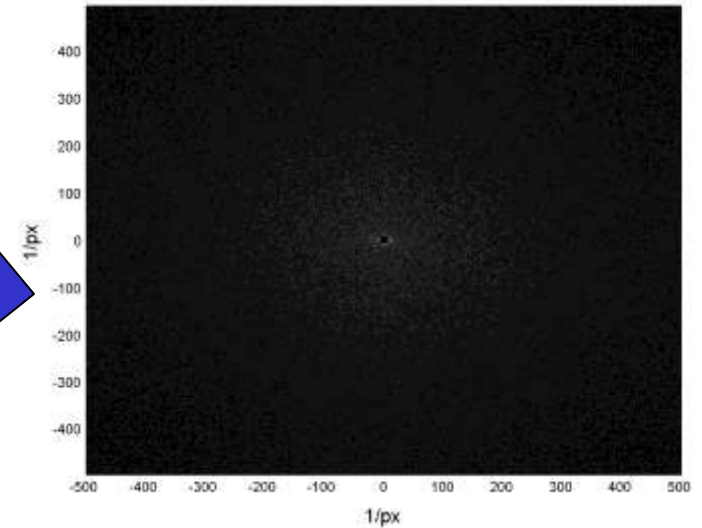
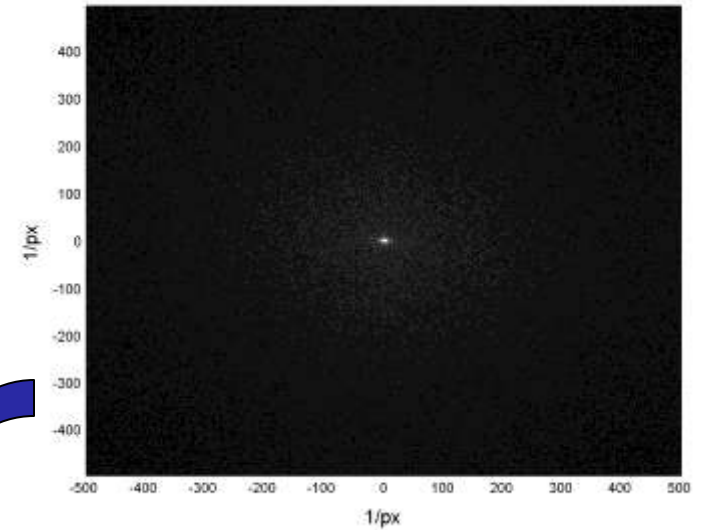
# Pré-processamento das imagens

– Técnicas utilizadas:

- Filtros passa-alta ou passa-faixa



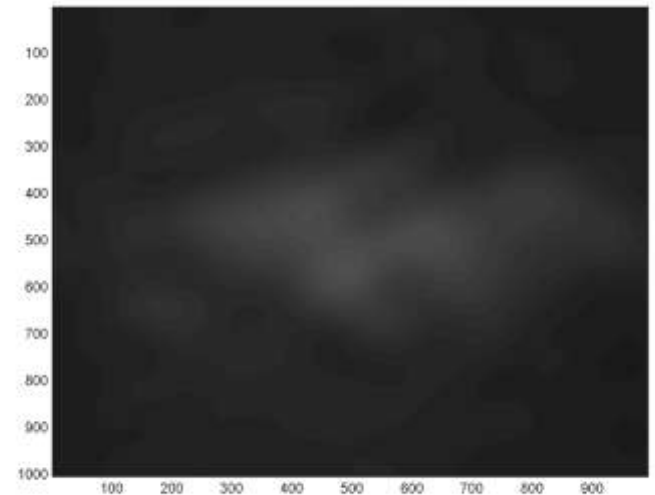
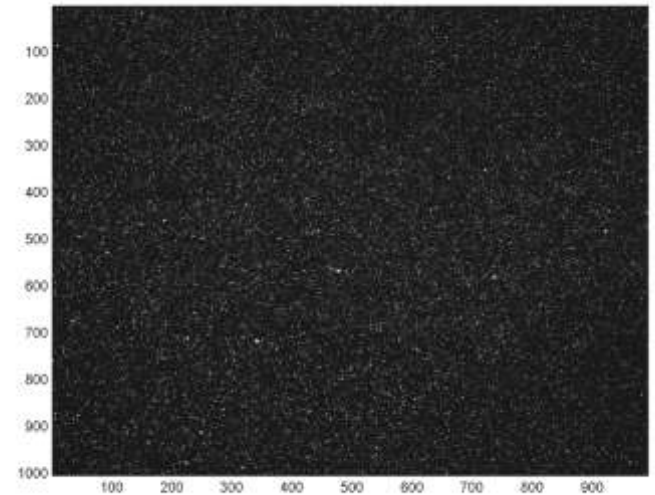
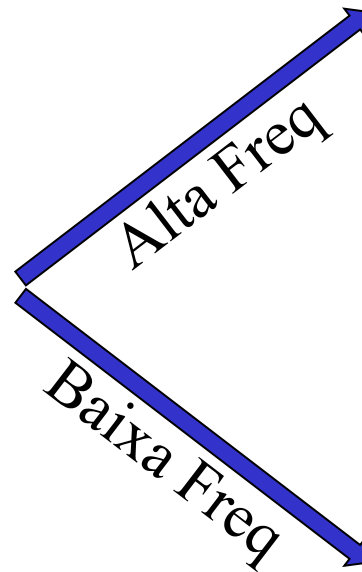
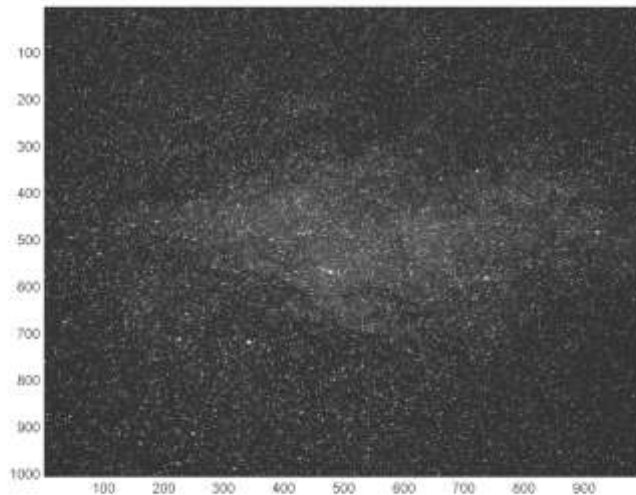
FFT



# Pré-processamento das imagens

– Técnicas utilizadas:

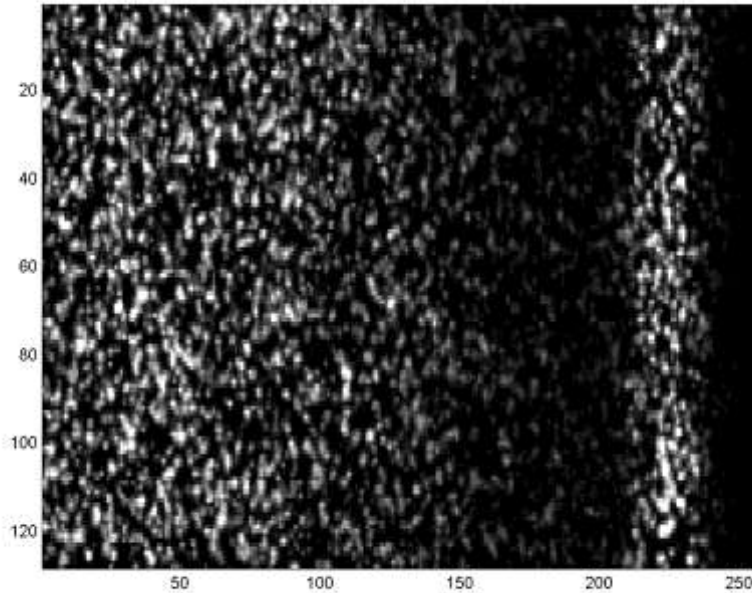
- Filtros passa-alta ou passa-faixa



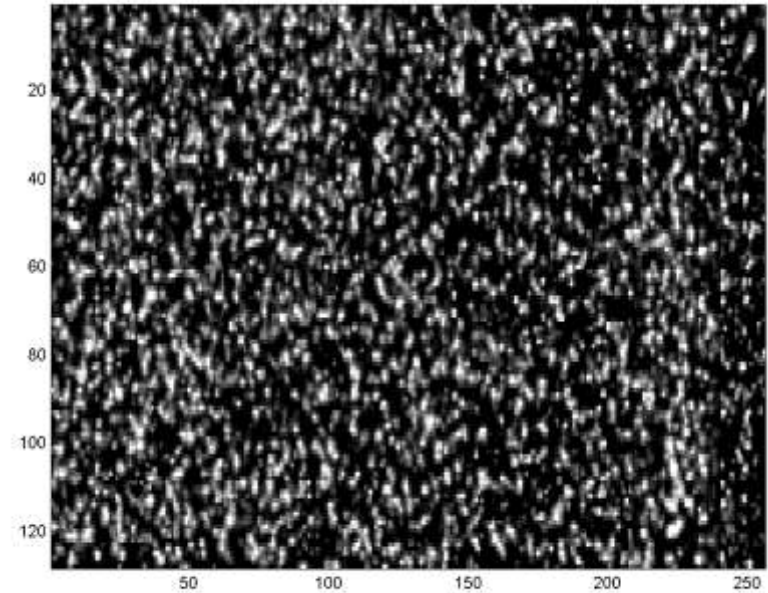
# Pré-processamento das imagens

- Normalização por janelas locais

Imagem variação de  
iluminação



Iluminação corrigida com  
uso de janelas locais



# Pré-processamento das imagens

- Equalização de intensidades

Imagem com pontos de saturação

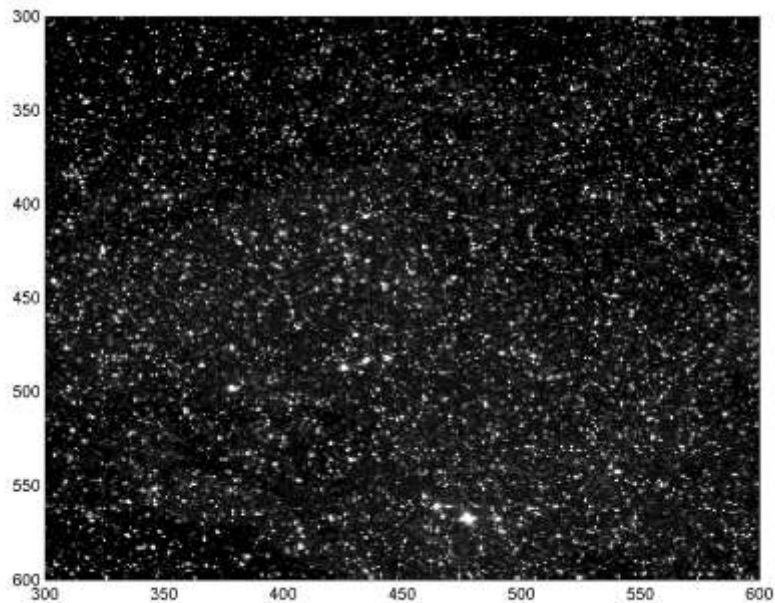
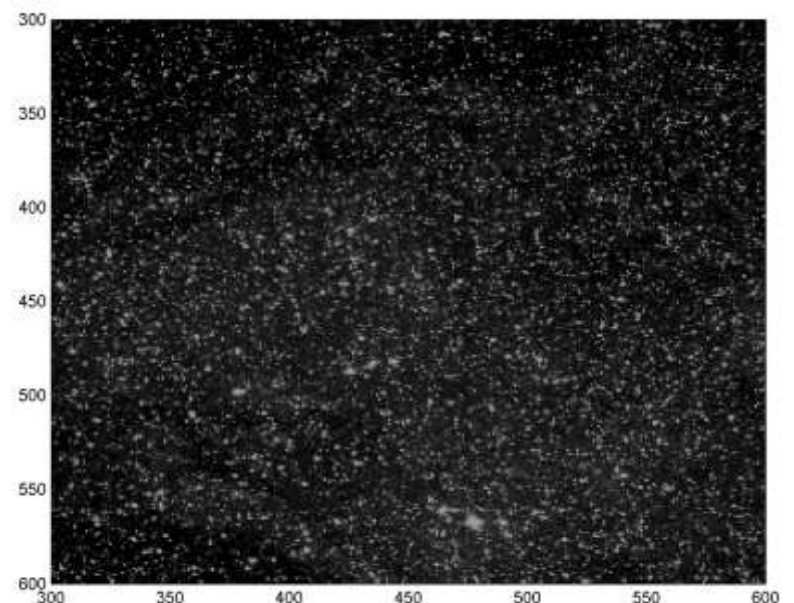
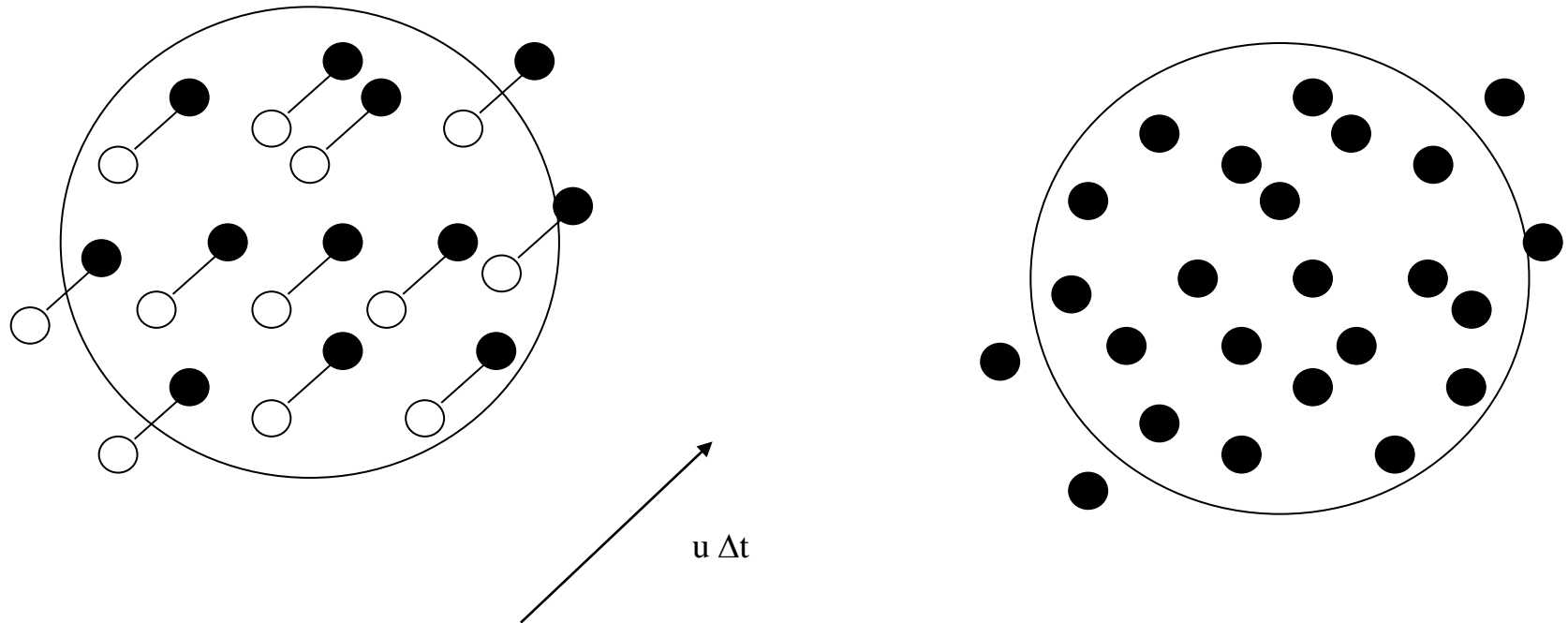


Imagem com intensidades equalizadas



# Processamento das Imagens - PIV



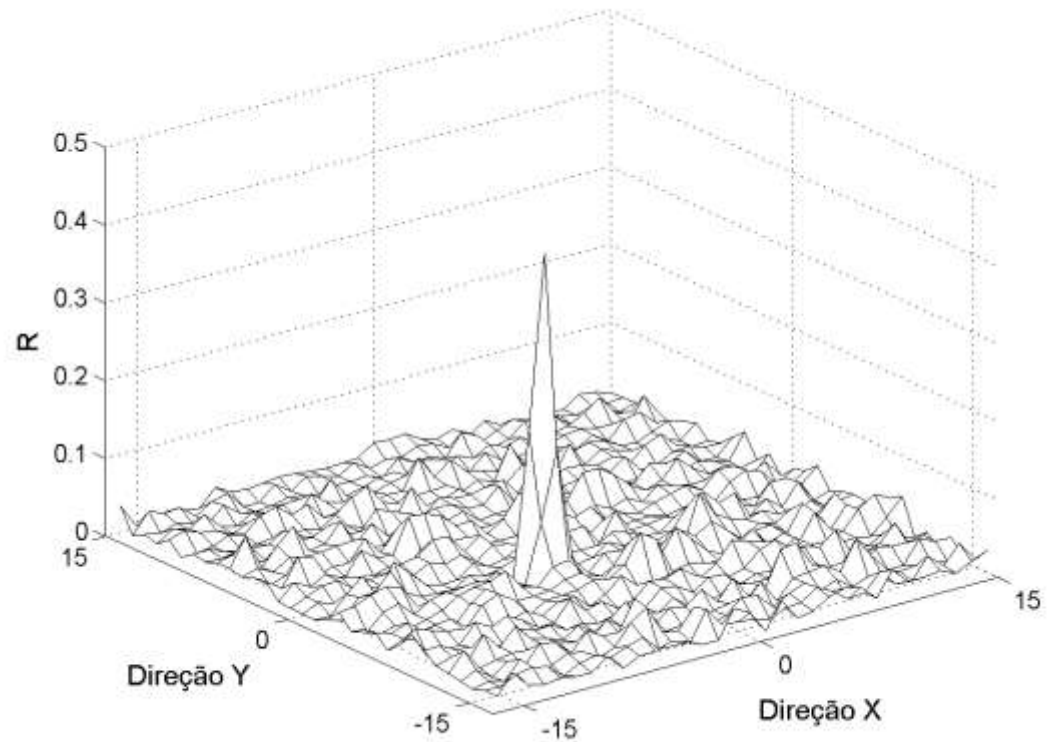
# Estimação dos deslocamentos

- Correlação

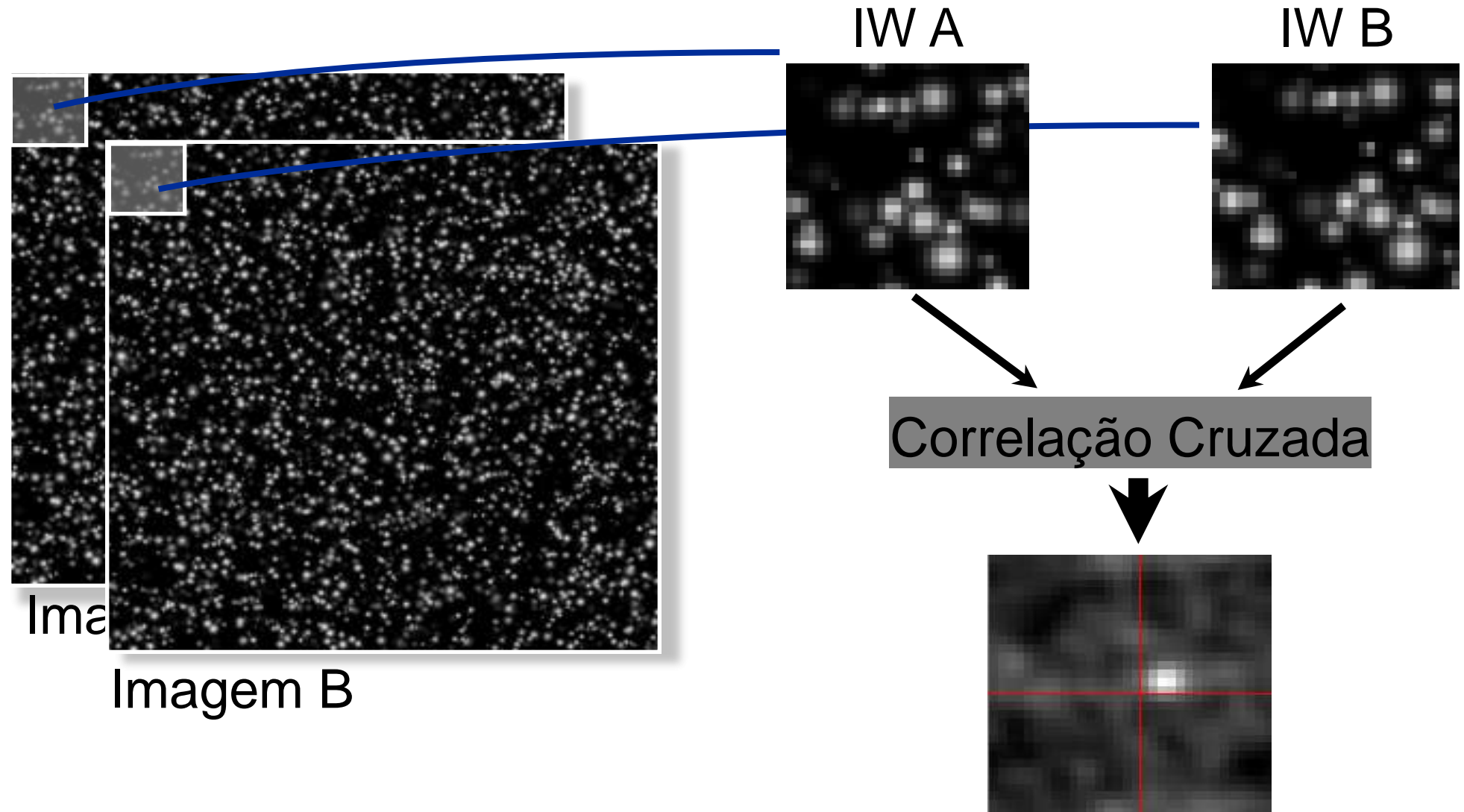
$$R(\Delta i, \Delta j) = \sum_i \sum_j I_1(i, j) I_2(i + \Delta i, j + \Delta j)$$

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

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

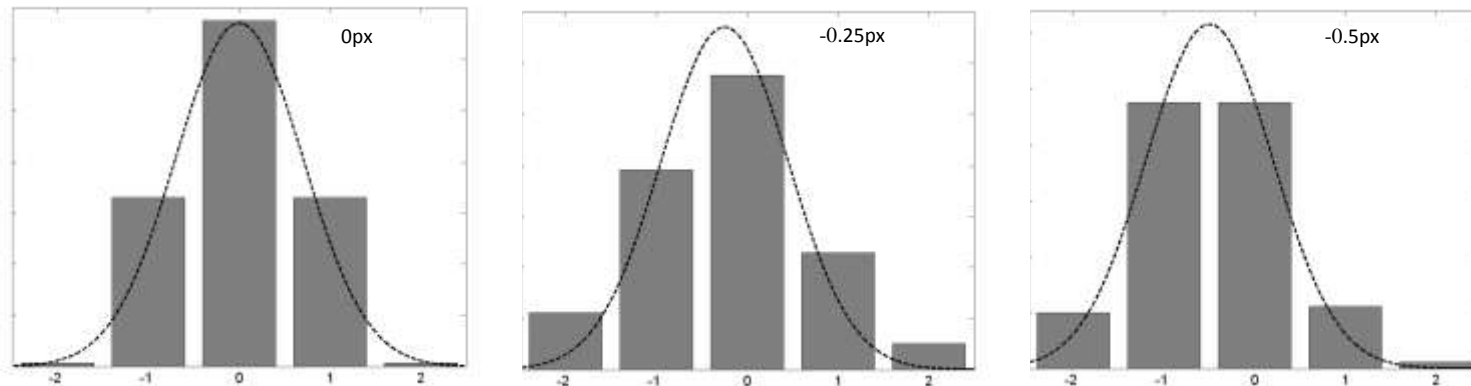


# Correlação Cruzada de Imagens



# Detecção dos picos de correlação

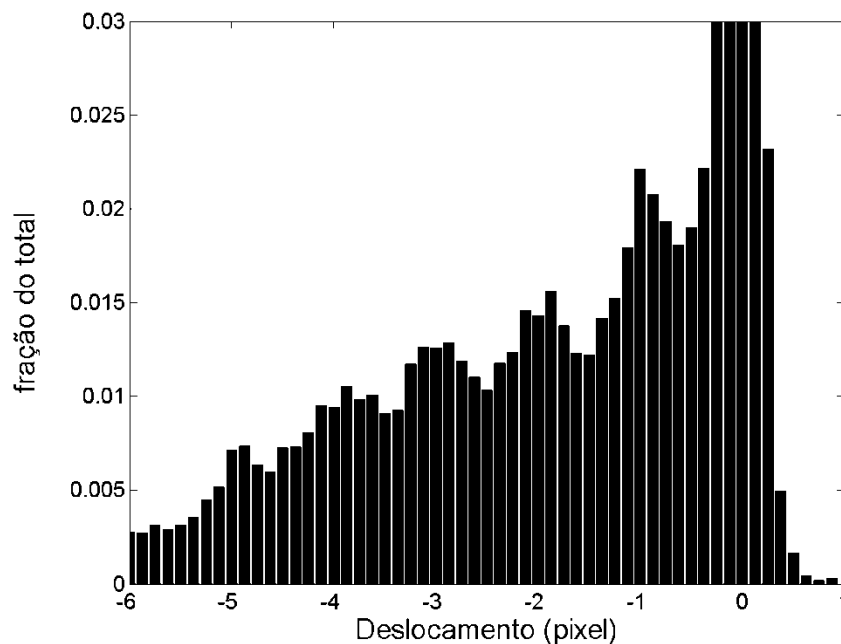
- Imagens originais são discretas, portanto picos são localizados com resolução da ordem de 1 pixel
- Métodos para localização de picos com resolução sub-pixel (da ordem de 1/20 pixel):
  - Ajuste parabólico, gaussiano, Wittaker, dentre outros



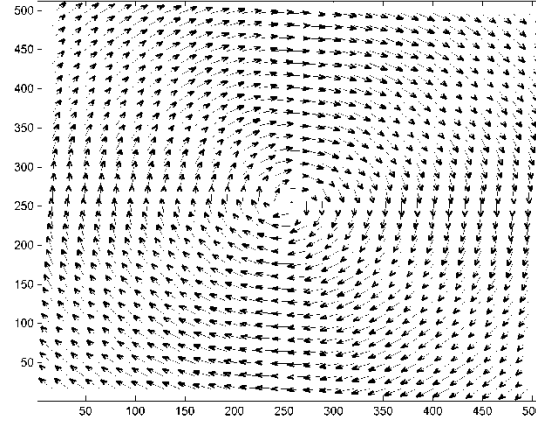
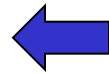
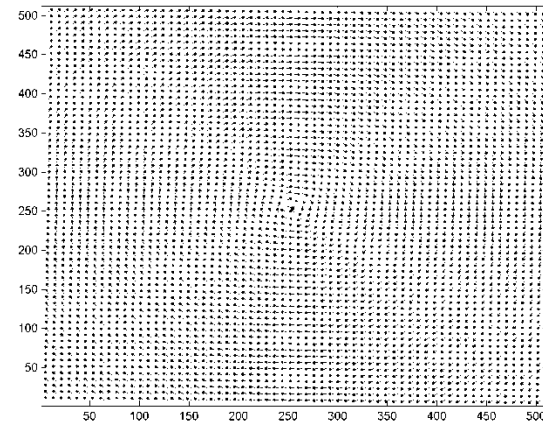
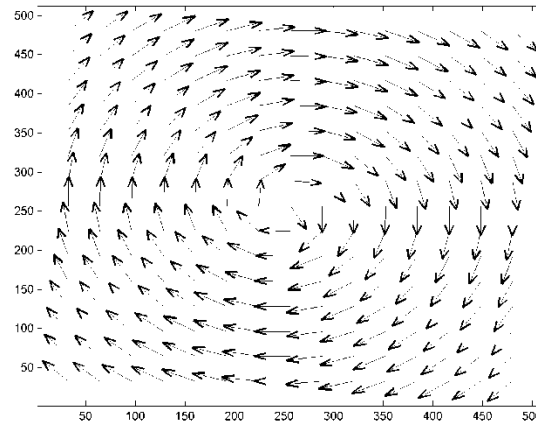
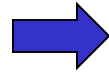
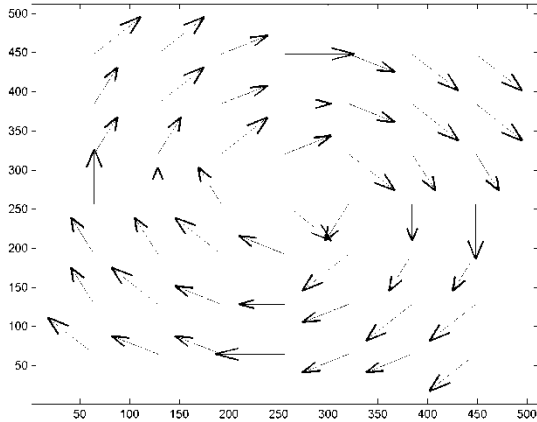


# Detecção dos picos de correlação

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



# Métodos de Interrogação – Multi-passe



## Vantagens

- > faixa dinâmica
- > precisão
- > resolução espacial

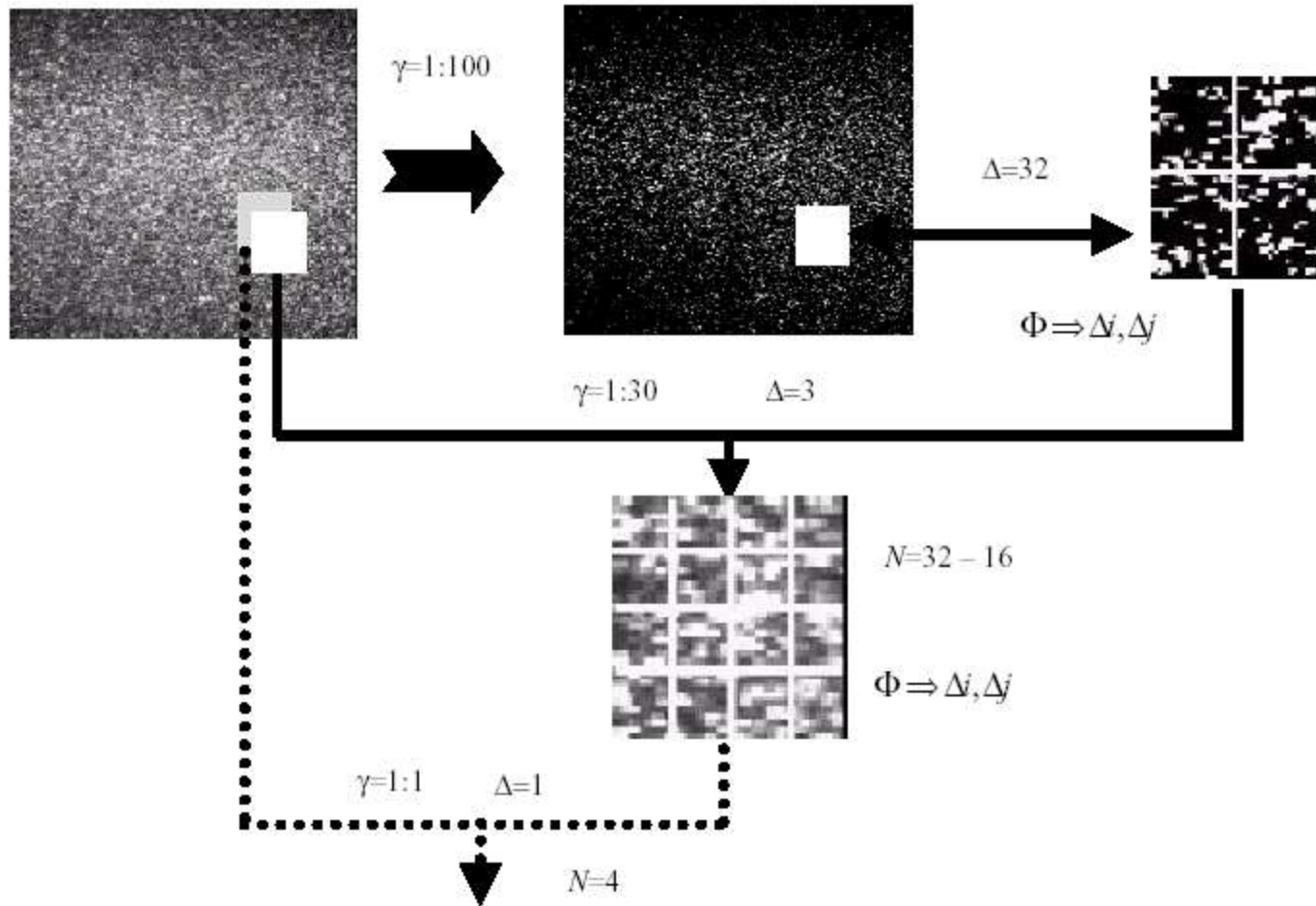
## Desvantagens

- > tempo de processamento
- Sujeito a efeitos de gradiente

# PIV de Alta Resolução

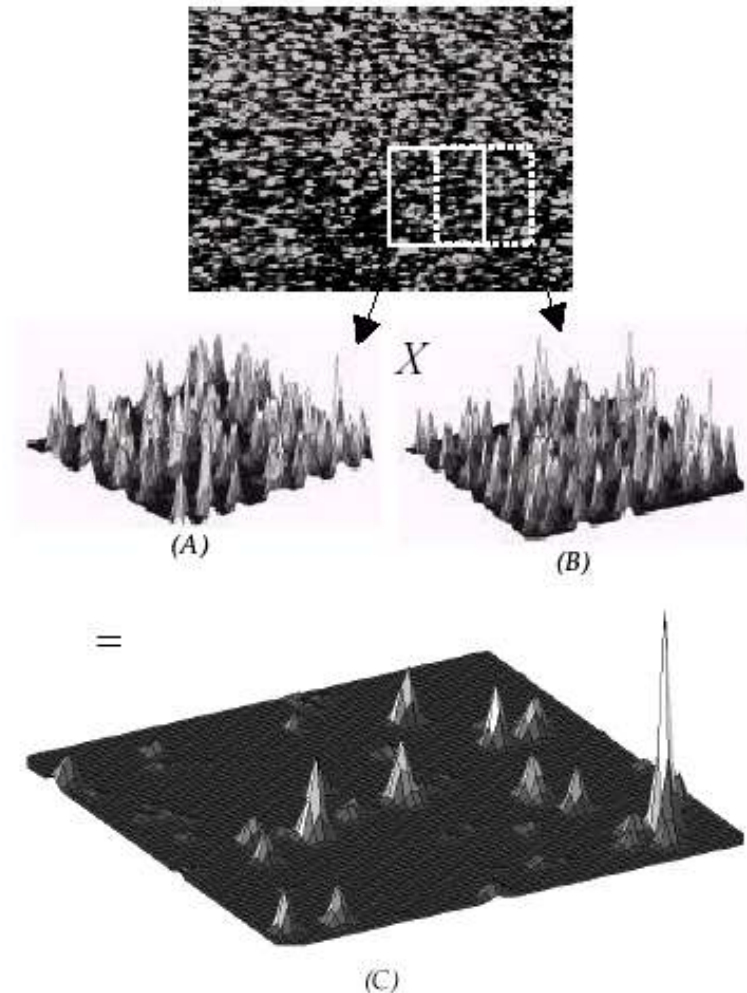
- Resolução espacial pode ser melhorada (Hart, 1999)
  - Múltiplos passes de correlação com janelas cada vez menores
  - Campo de velocidade calculado guia a localização das próximas janelas
  - Cálculos podem levar ao limite da imagem das partículas (PIV+PTV)
  - Erros nos campos se propagam

# PIV de Alta Resolução



# PIV de Alta Resolução

- Técnica de correlação para correção do erro no deslocamento (Hart, 1999)

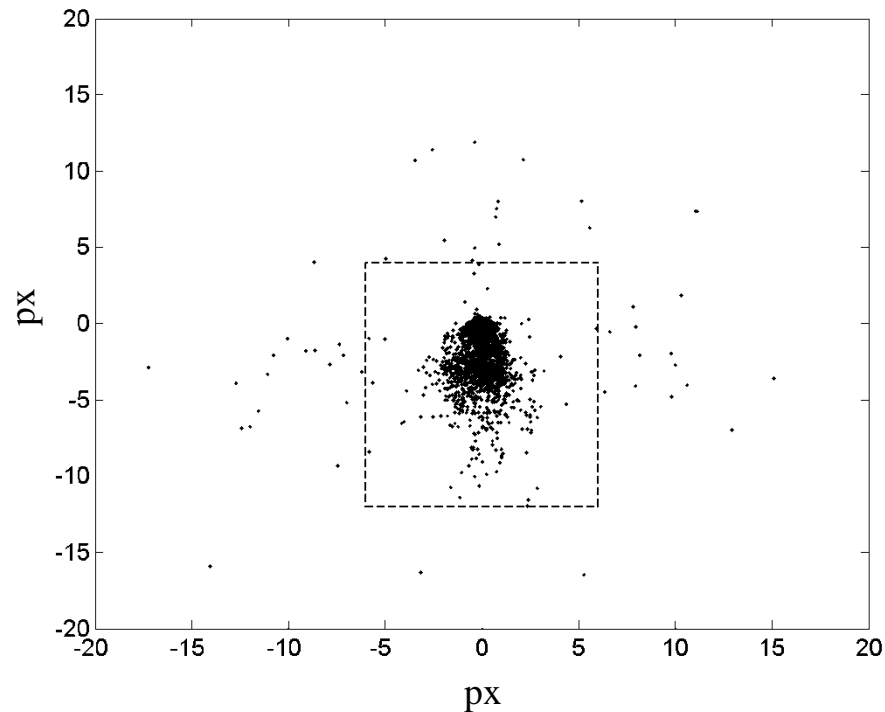


# Pós-processamento

- 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

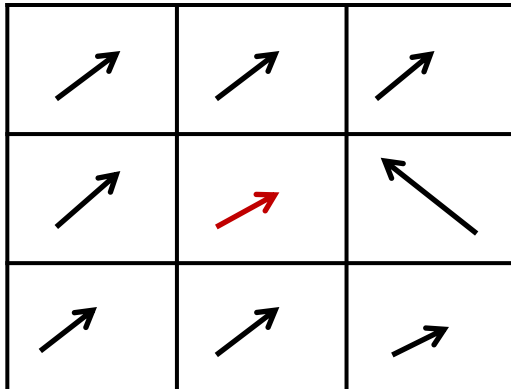


# Pós-processamento

## – 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

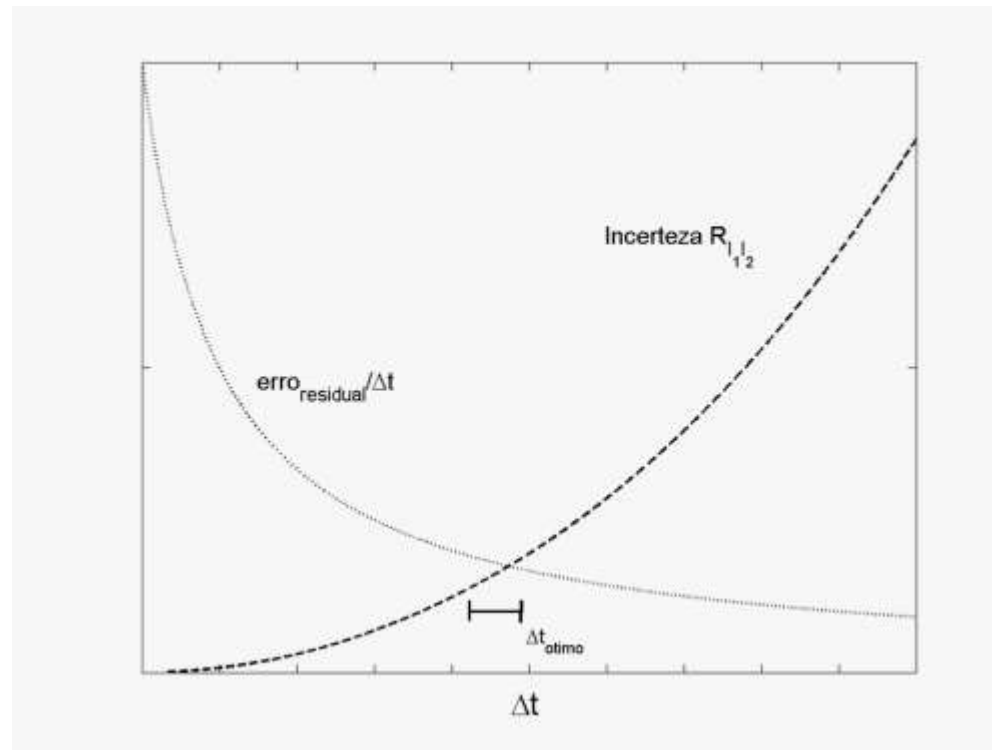
- Intervalo entre Pulsos
  - parâmetro mais importante
  - mais fácil e preciso de controlar
  - ajustado para minimizar:
    - perdas de pares no plano (correlação)

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

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

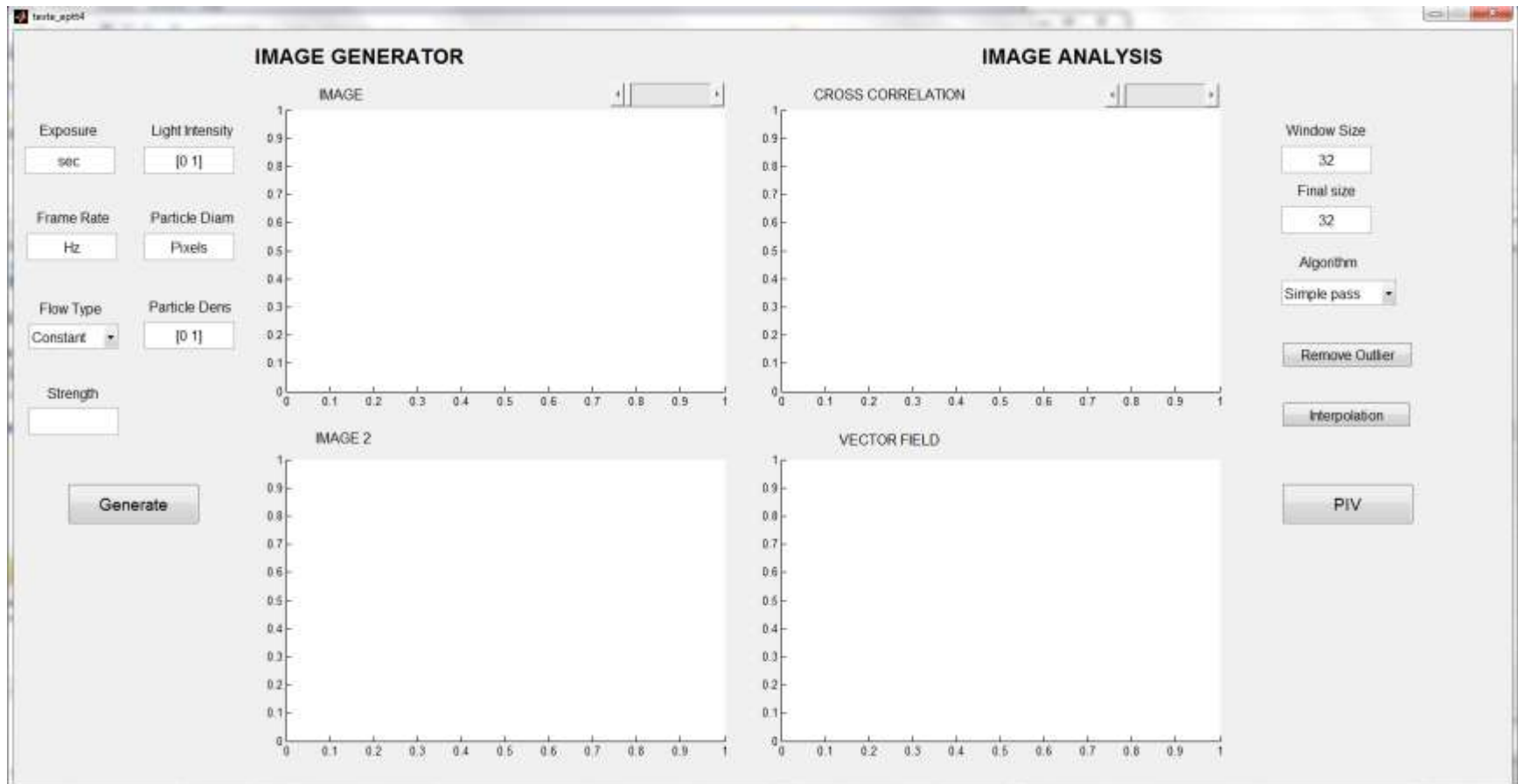
# PIV- Considerações Práticas

- Intervalo entre Pulsos



# PIV- Considerações Práticas

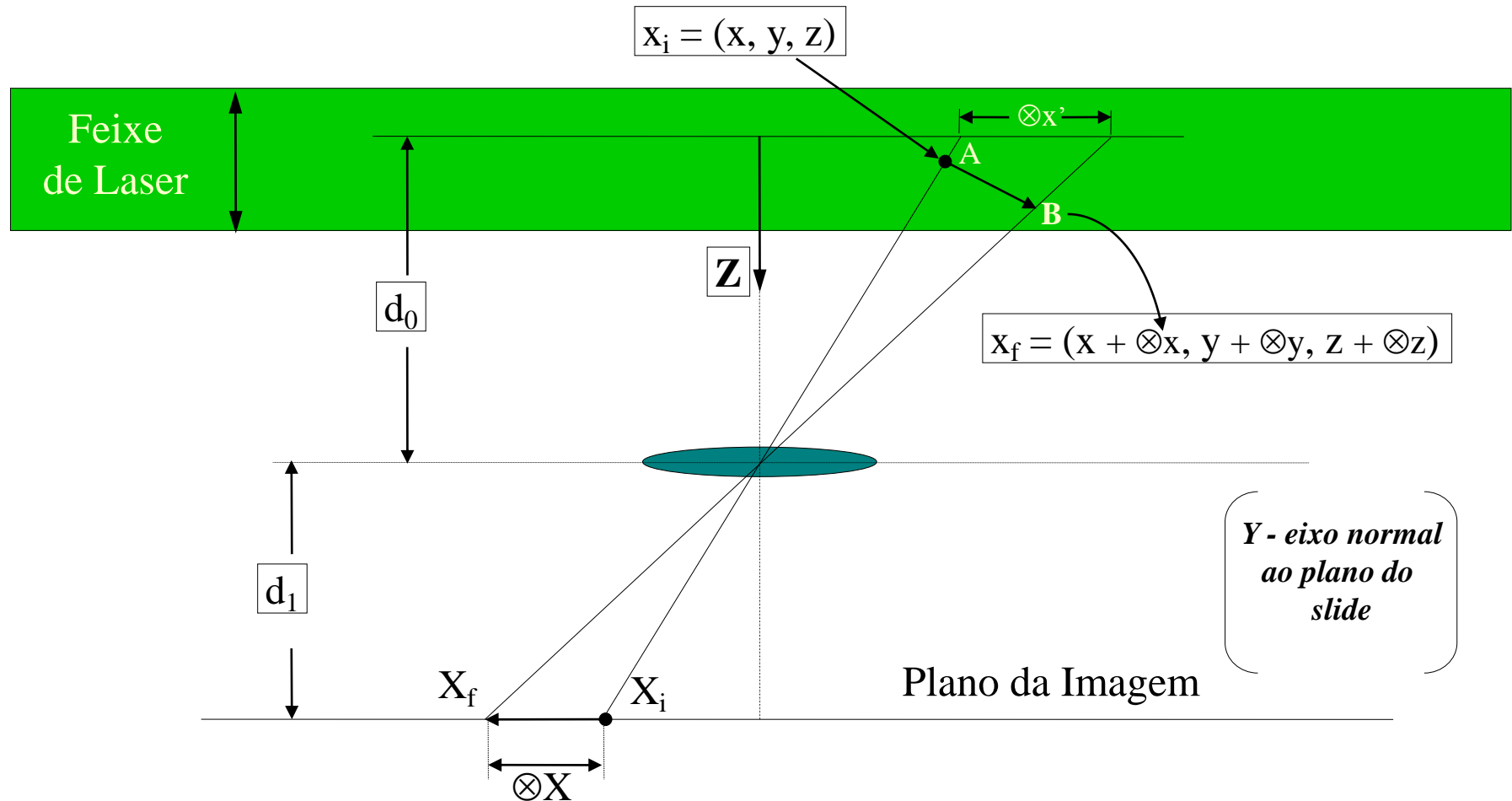
- Exemplo: simulador PIV



# Sistema PIV Estéreo



# Vetor no plano de iluminação



# Perspectiva devido a inclinação

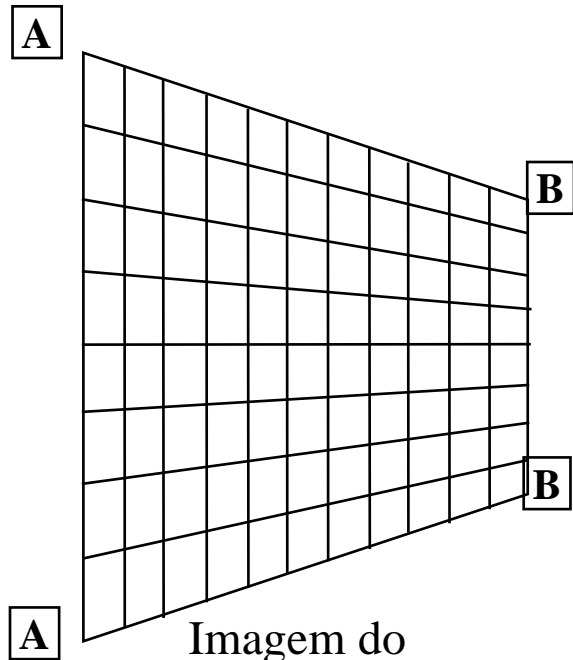
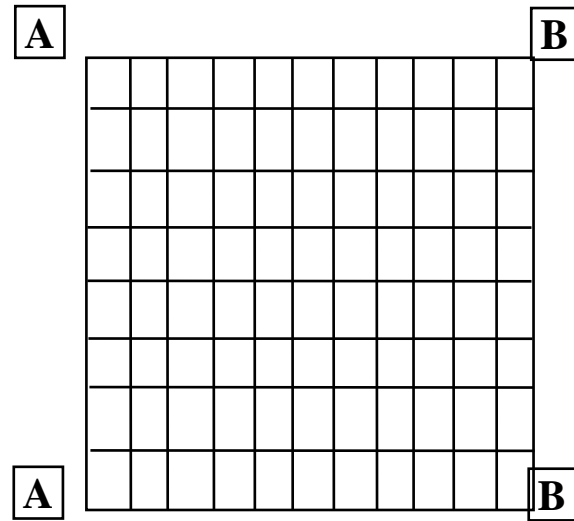


Imagem do  
alvo na camera  
da esquerda



Alvo regular no fluido

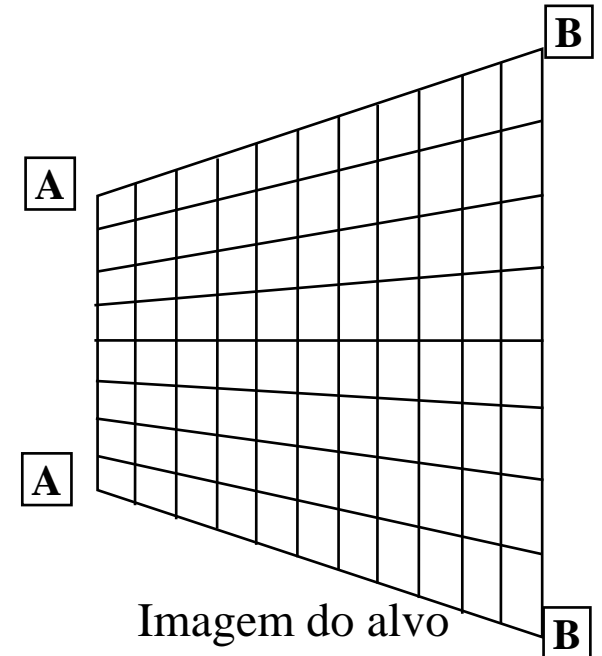
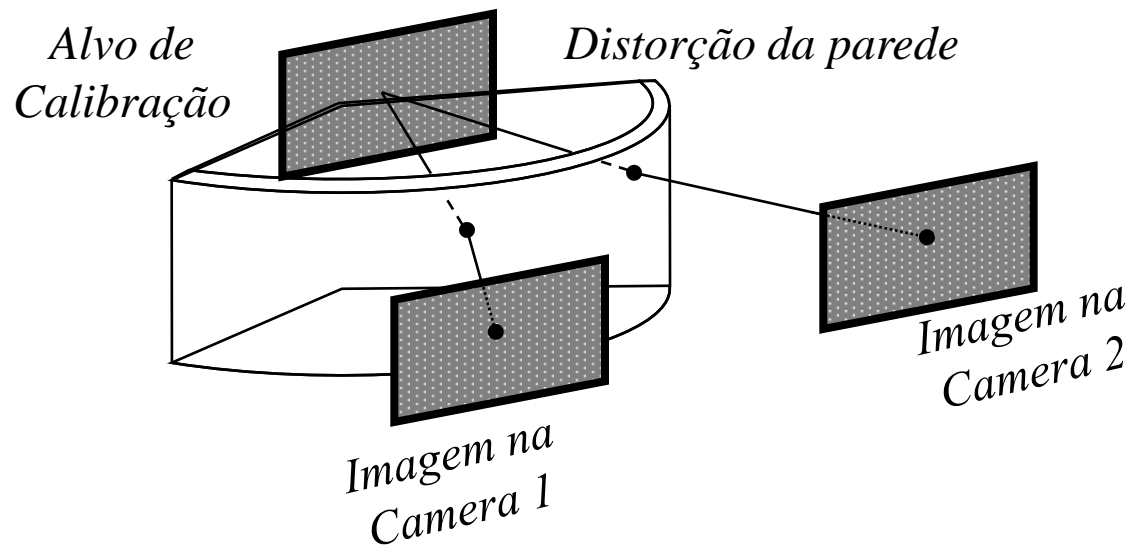


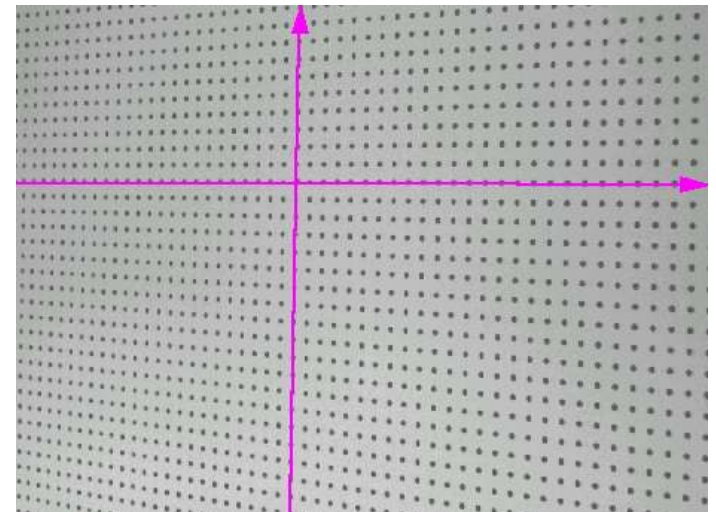
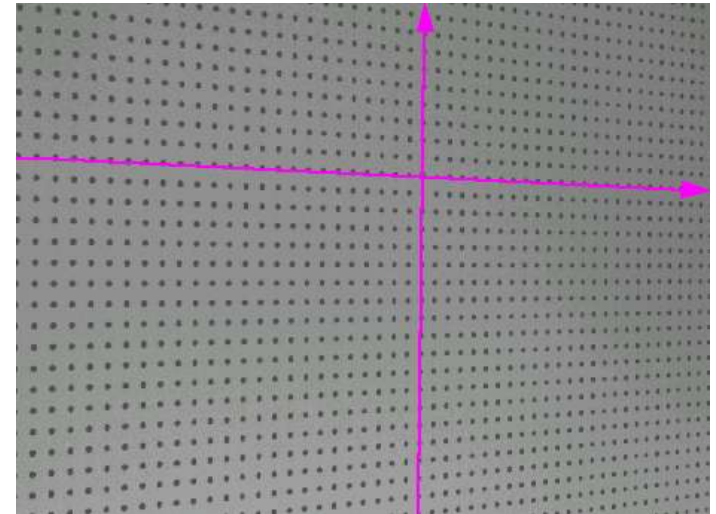
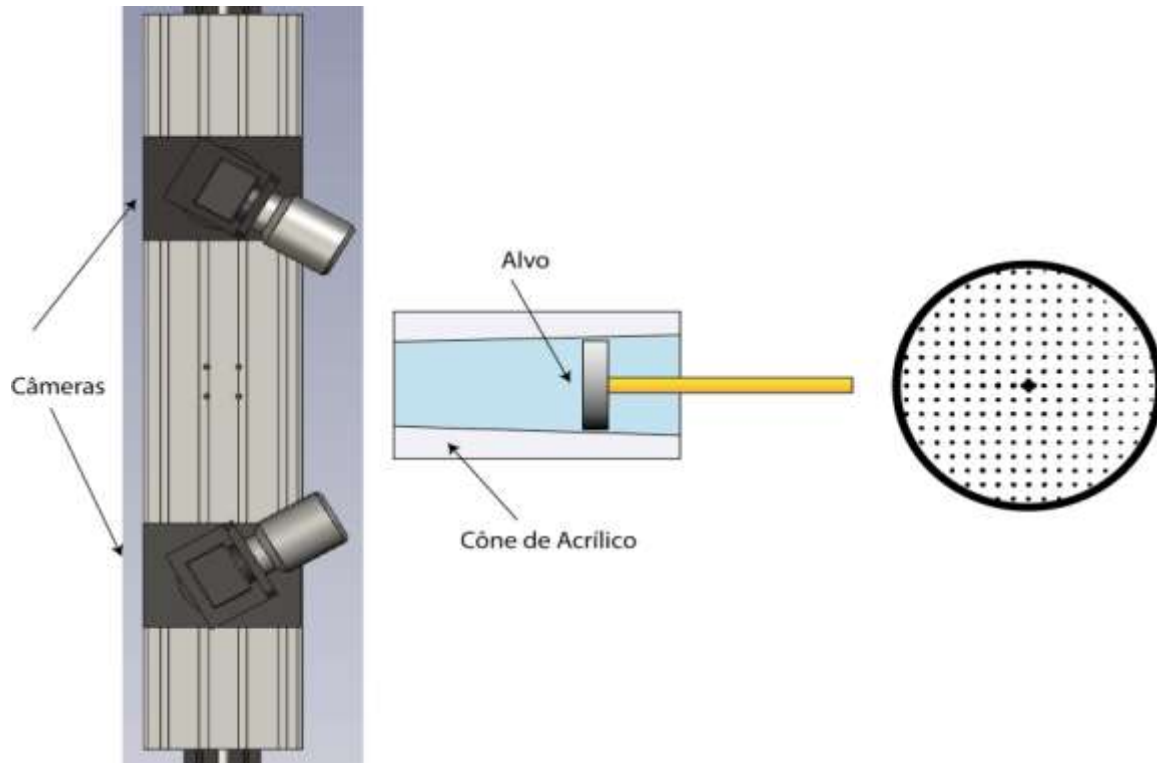
Imagem do alvo  
na camera da  
camera

# Técnica Estereoscópica - Calibração

- Registro da imagem das duas câmeras – alinhamento para visualização da mesma região
- Correção da distorção devido à mudança de meio
- Gerar uma função para mapear vetores do plano da camera no plano do objeto



# Calibração PIV- estéreo





# PIV 3D estéreo instantâneo

- 3 componentes de velocidade no plano

- 5 – 10 Hz

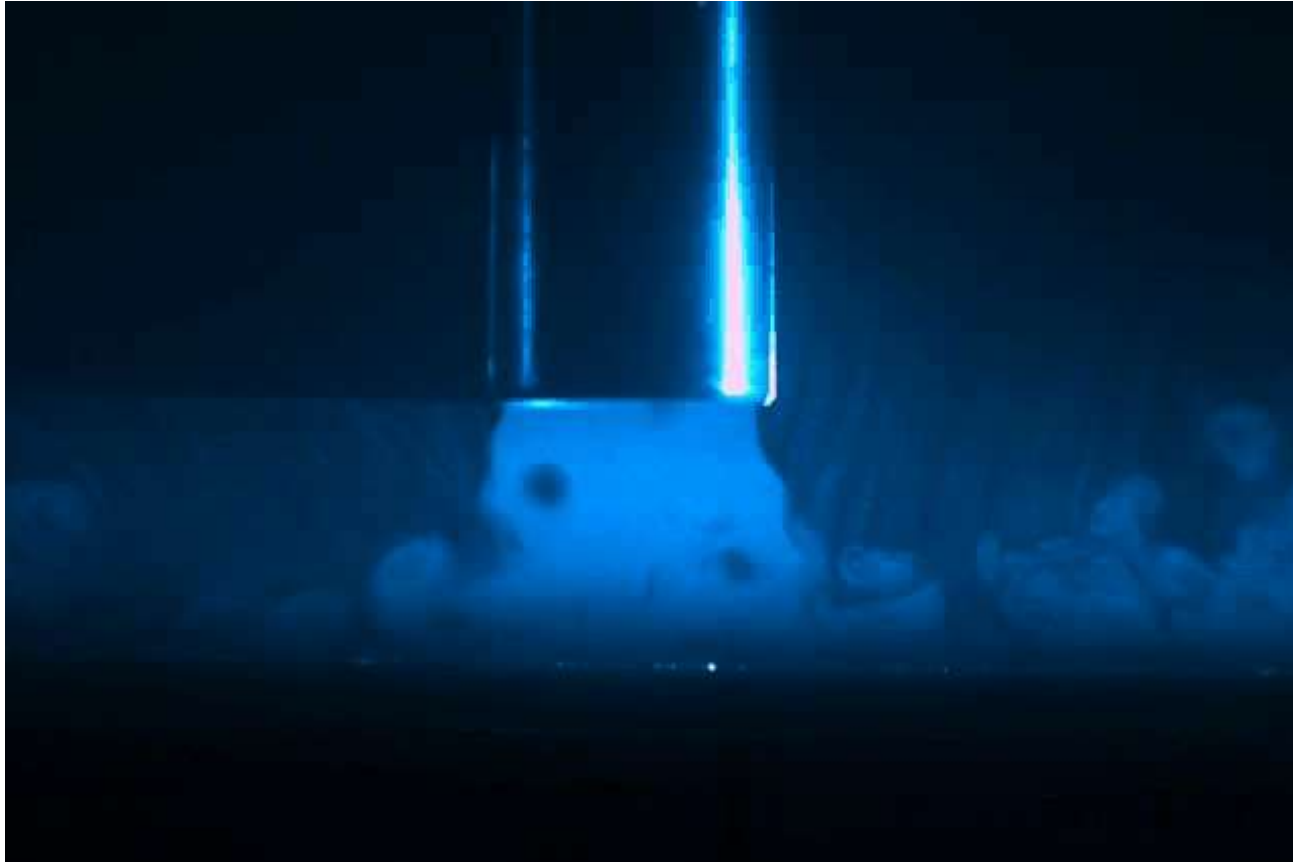
$u(x, y)$

$v(x, y)$

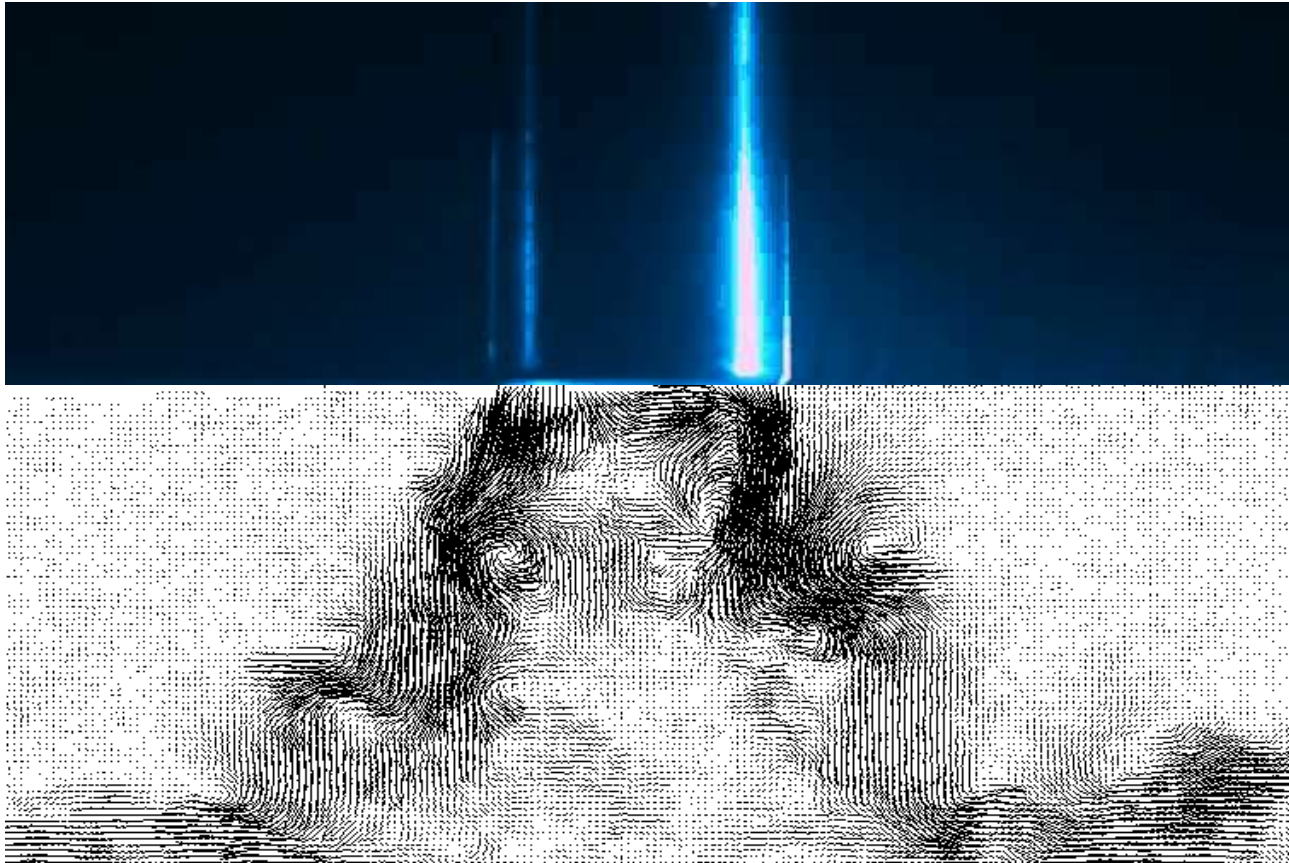
$w(x, y)$

$$\vec{\nabla} \vec{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ - & - & - \end{bmatrix}$$

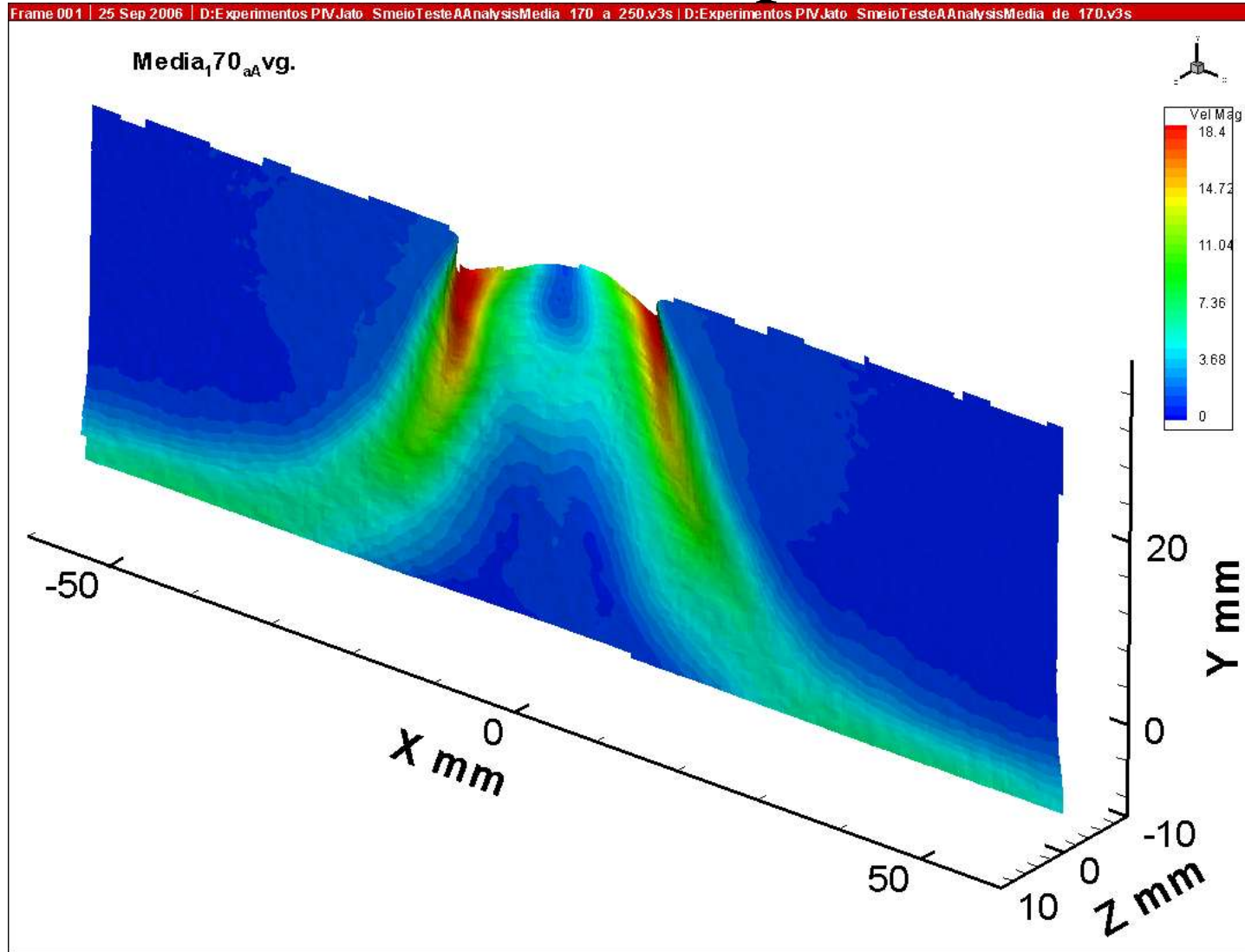
# Jato Espiralado Incidente



# Jato Espiralado Incidente

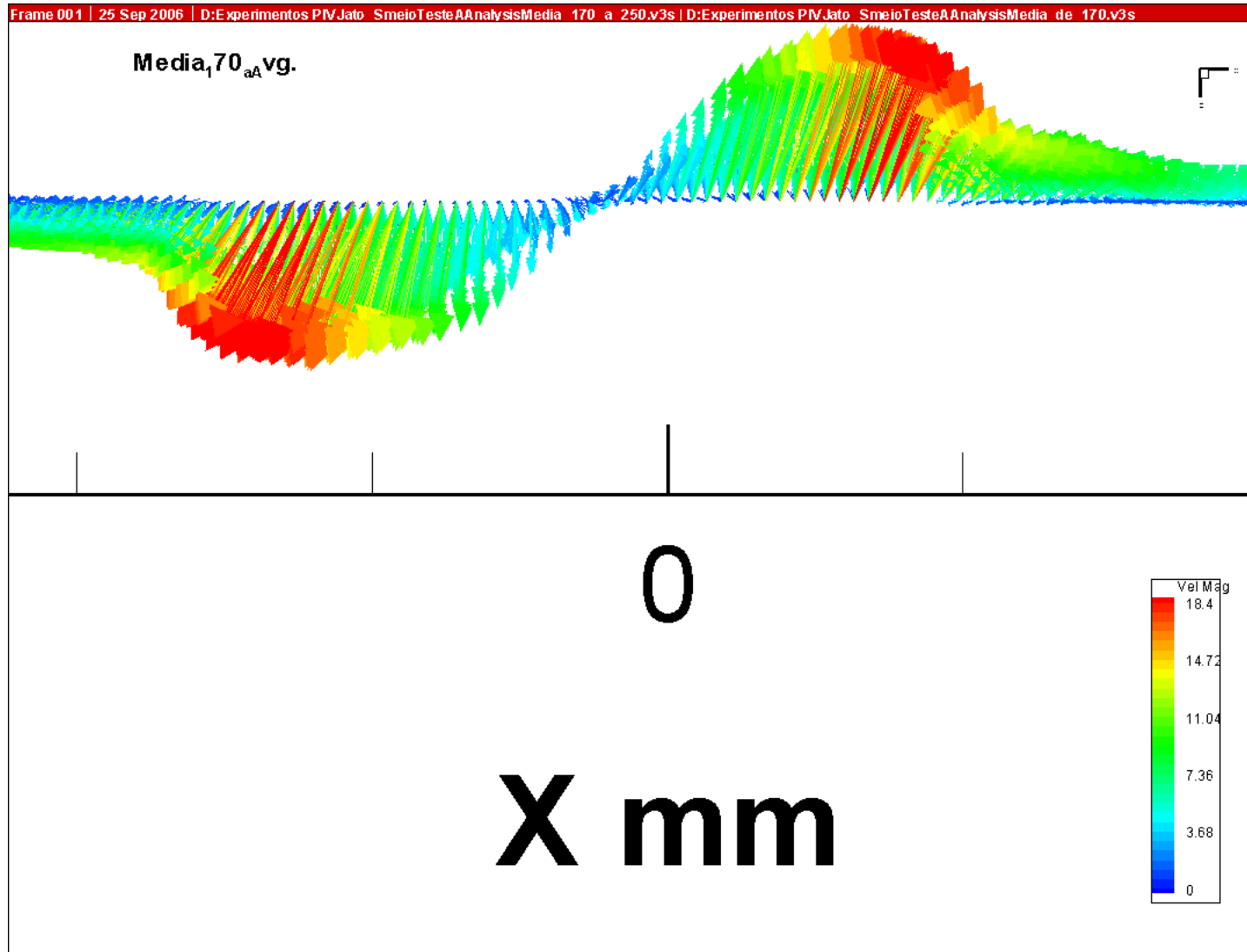


# Jato Incidente Espiralado

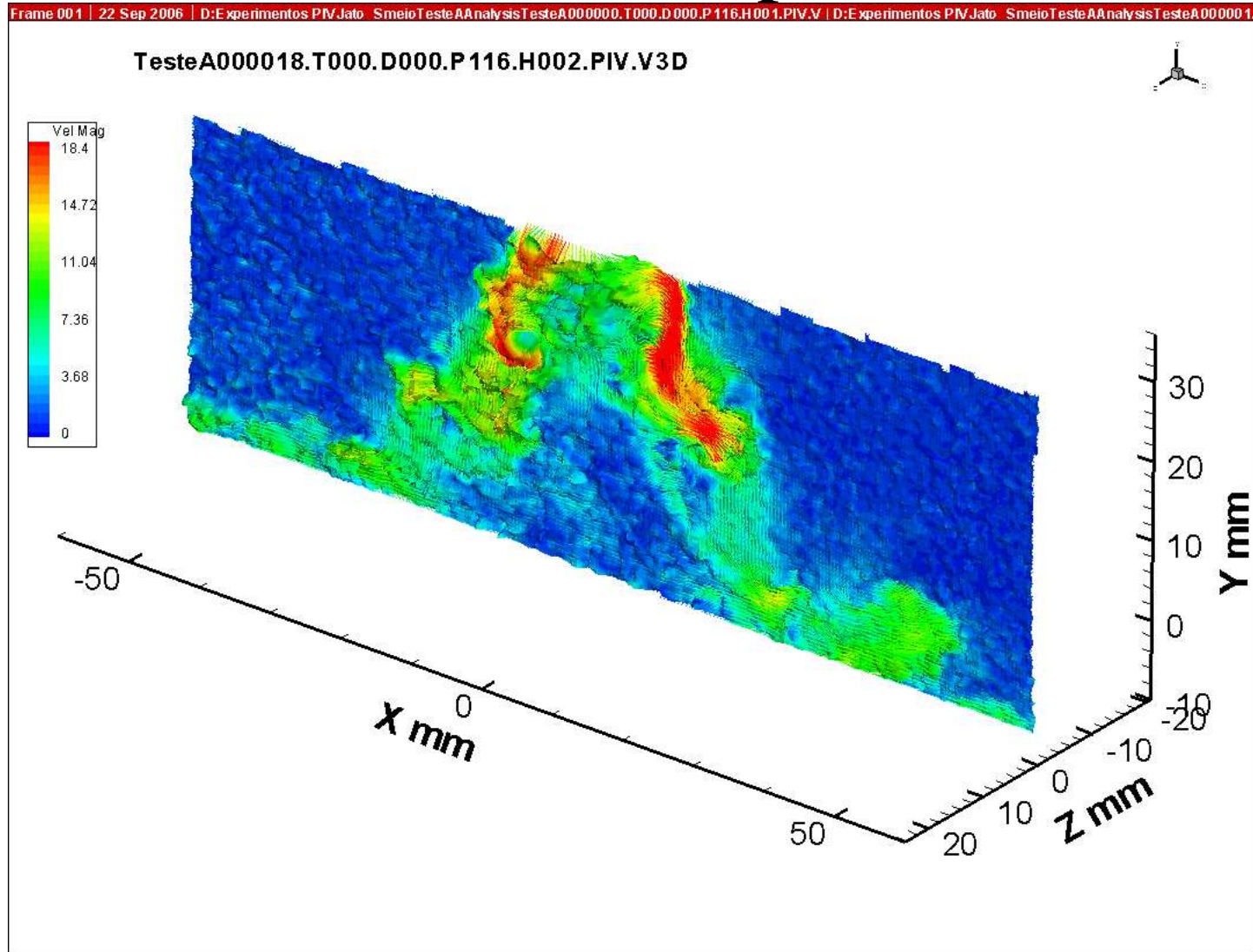


# Jato Incidente Espiralado

J.K. Abrantes e L.F.A. Azevedo

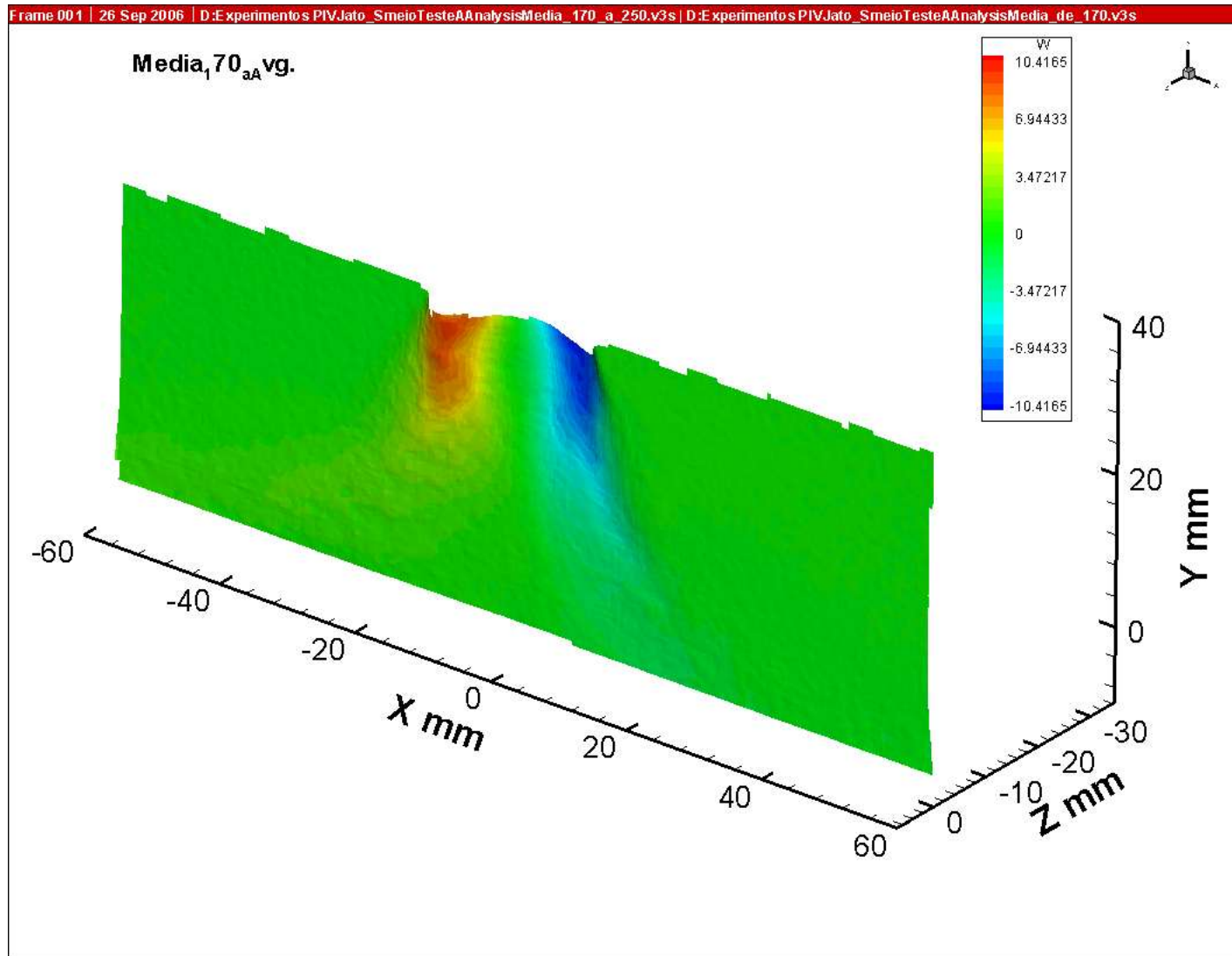


# Jato Incidente Espiralado

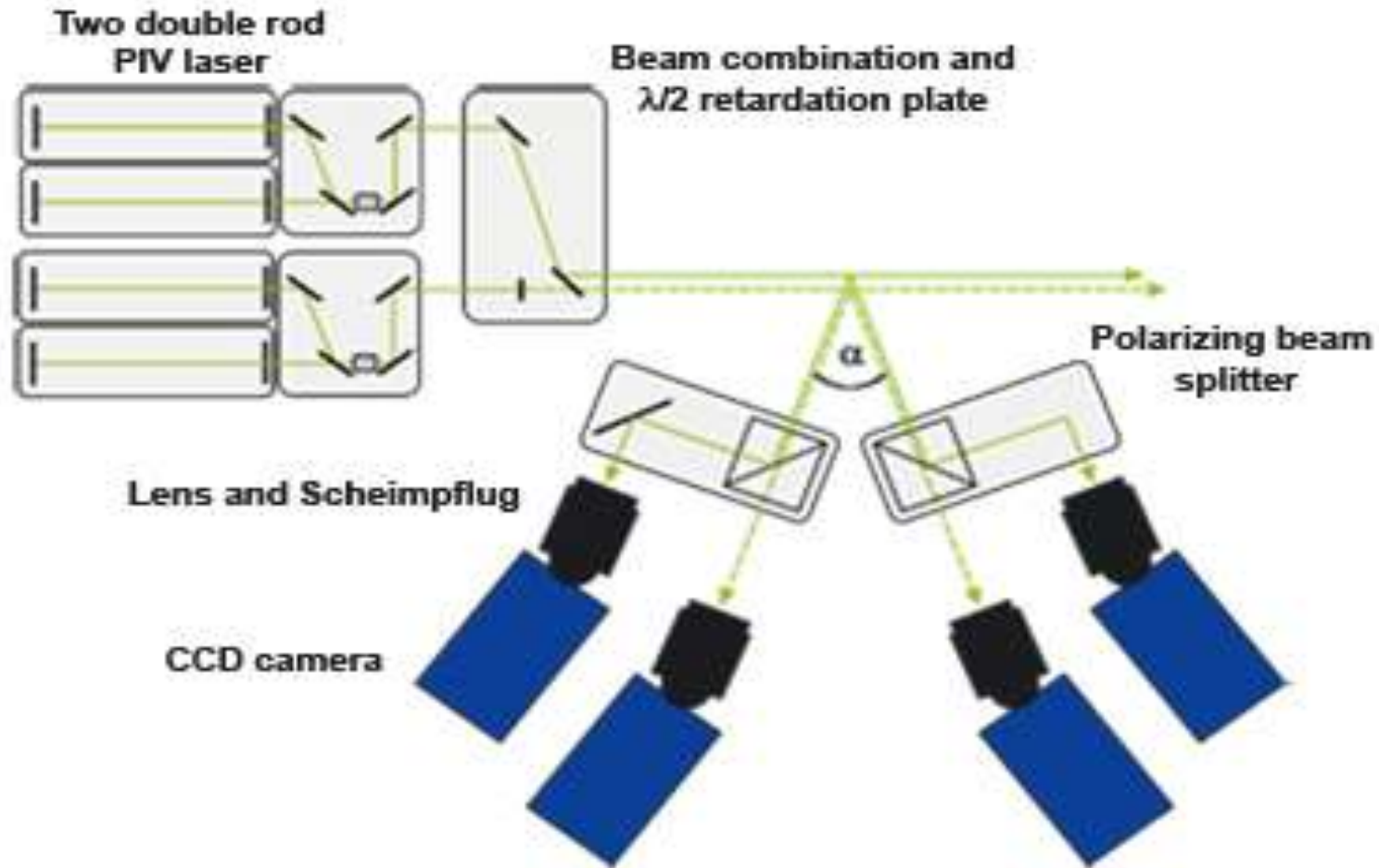


# Jato Incidente Espiralado

J.K. Abrantes e L.F.A. Azevedo



# Dual-Plane, Stereo PIV





# PIV Instantâneo em dois planos

- 3 componentes de velocidade em dois planos próximos (ou até na mesma posição)

- Campo de acelerações

$$u(x, y)$$

$$v(x, y)$$

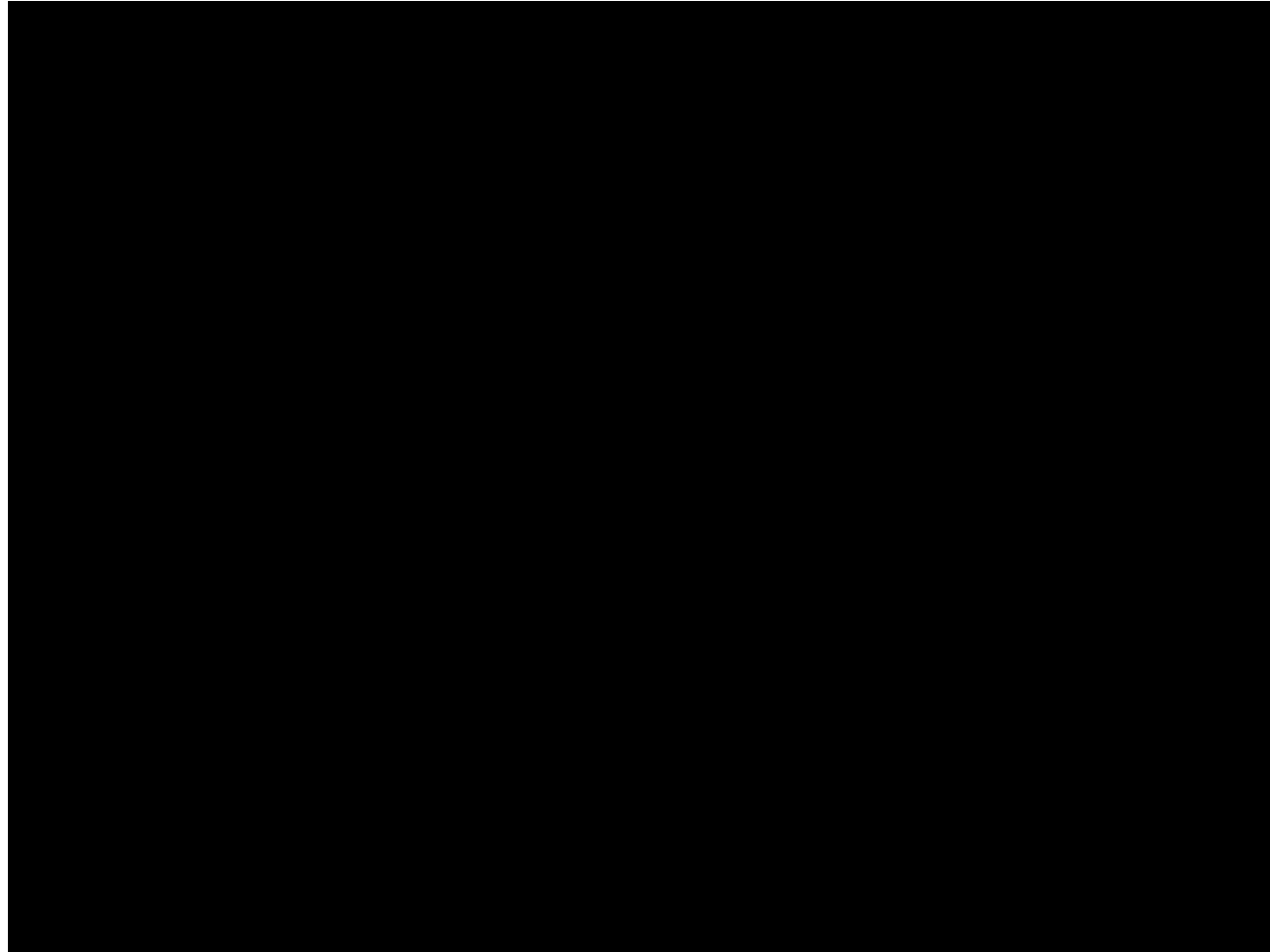
$$w(x, y)$$

(in each plane)

$$\vec{\nabla} \vec{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{u} = \left[ \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] \hat{e}_x + \left[ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] \hat{e}_y + \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \hat{e}_z$$

# PIV de Alta Frequência



# PIV estéreo 3D com resolução temporal

- 3 componentes de velocidade em um plano
- Cameras de alta velocidade: ( $\sim 1\text{kHz}$ )
- Estruturas coerentes

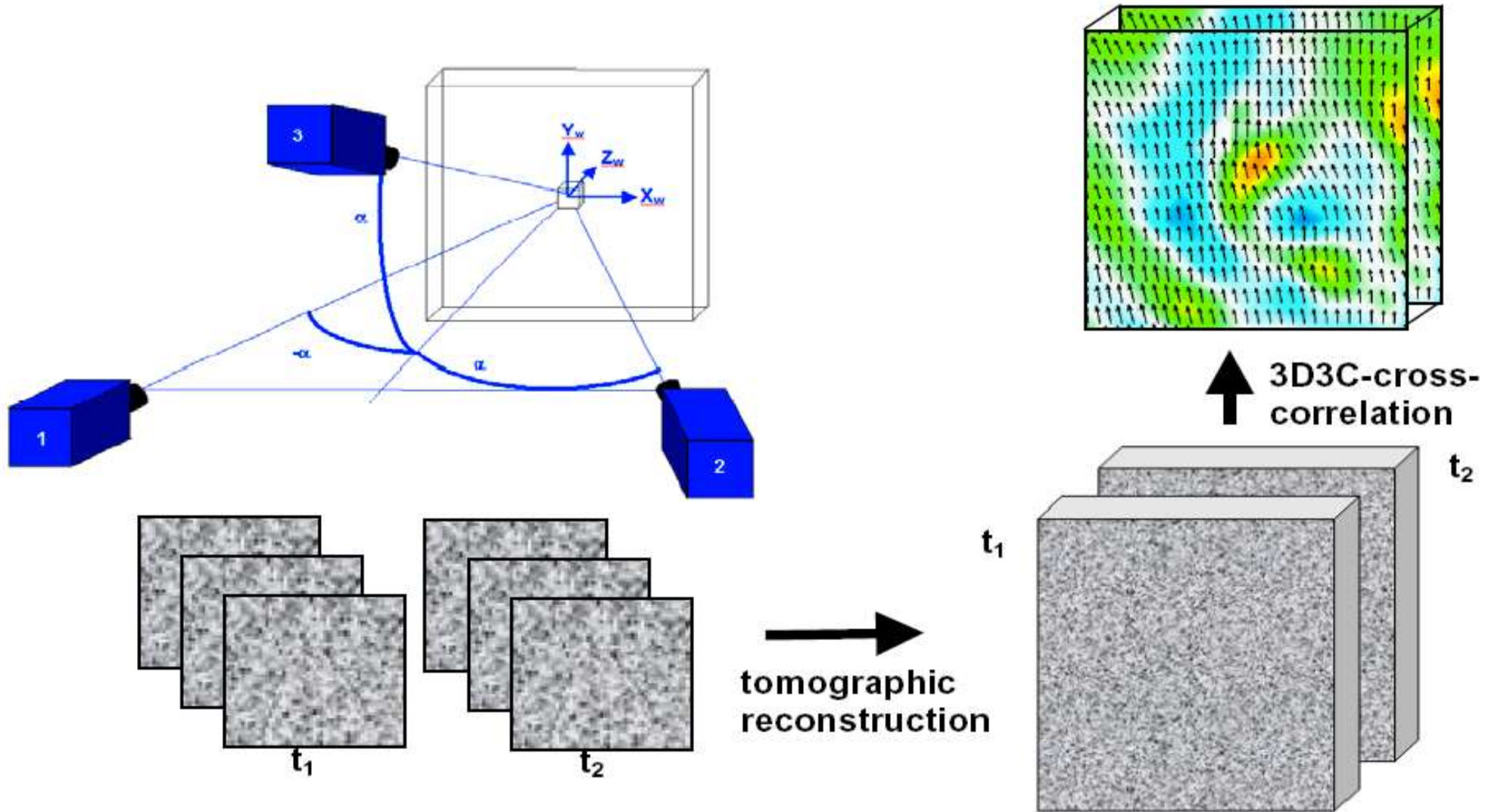
$$u(x, y, t)$$

$$v(x, y, t)$$

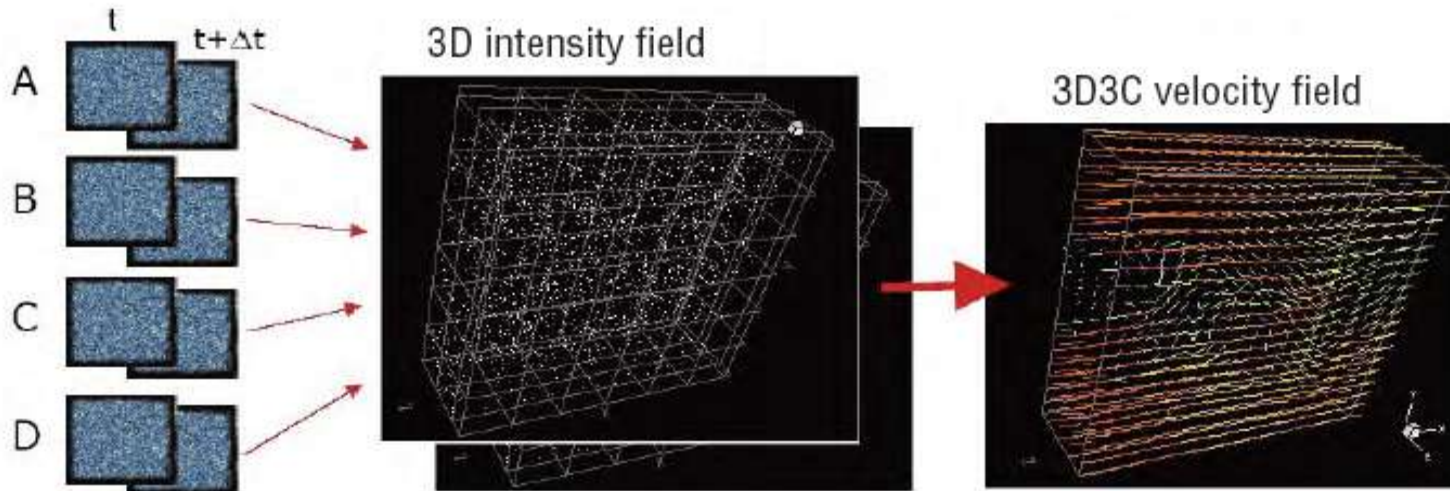
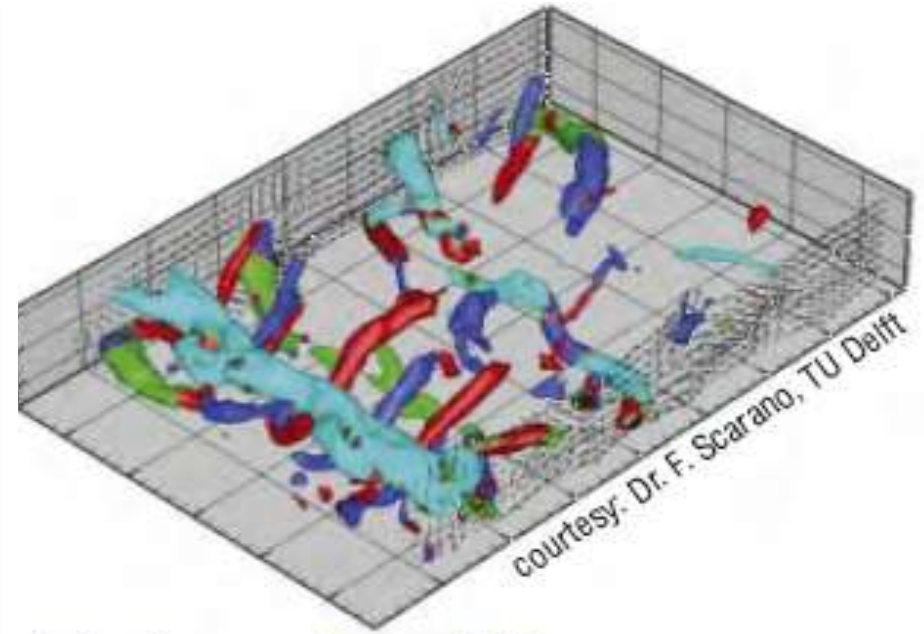
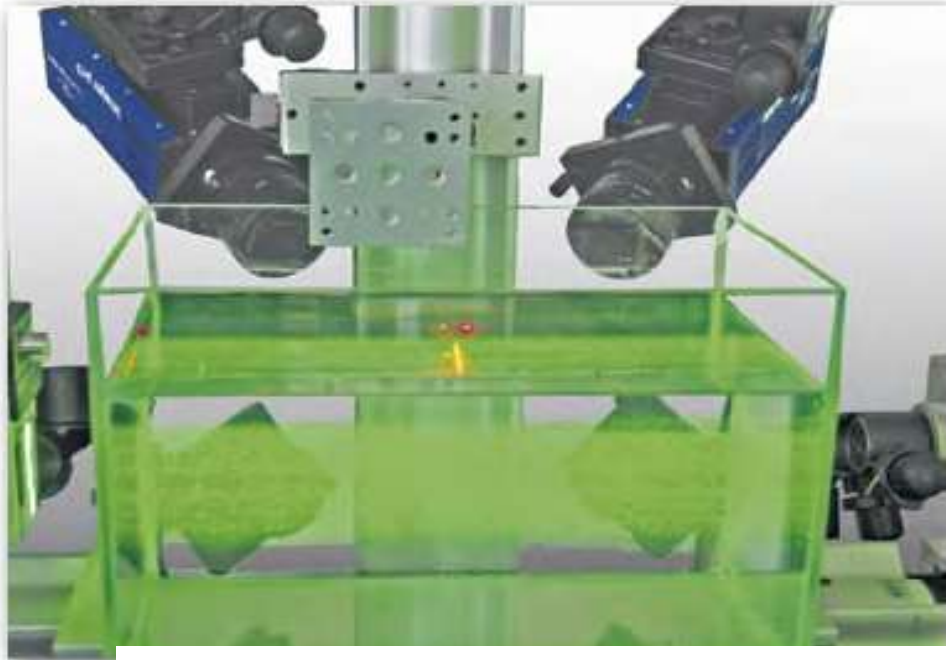
$$w(x, y, t)$$

$$\vec{\nabla} \vec{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ - & - & - \end{bmatrix}$$

# PIV Tomográfico



# PIV Tomográfico



# Tomo-PIV instantâneo

- 3 componentes de velocidade
- Grande volume de dados
- Pode ser com alta resolução temporal

$$u(x, y, z)$$

$$v(x, y, z)$$

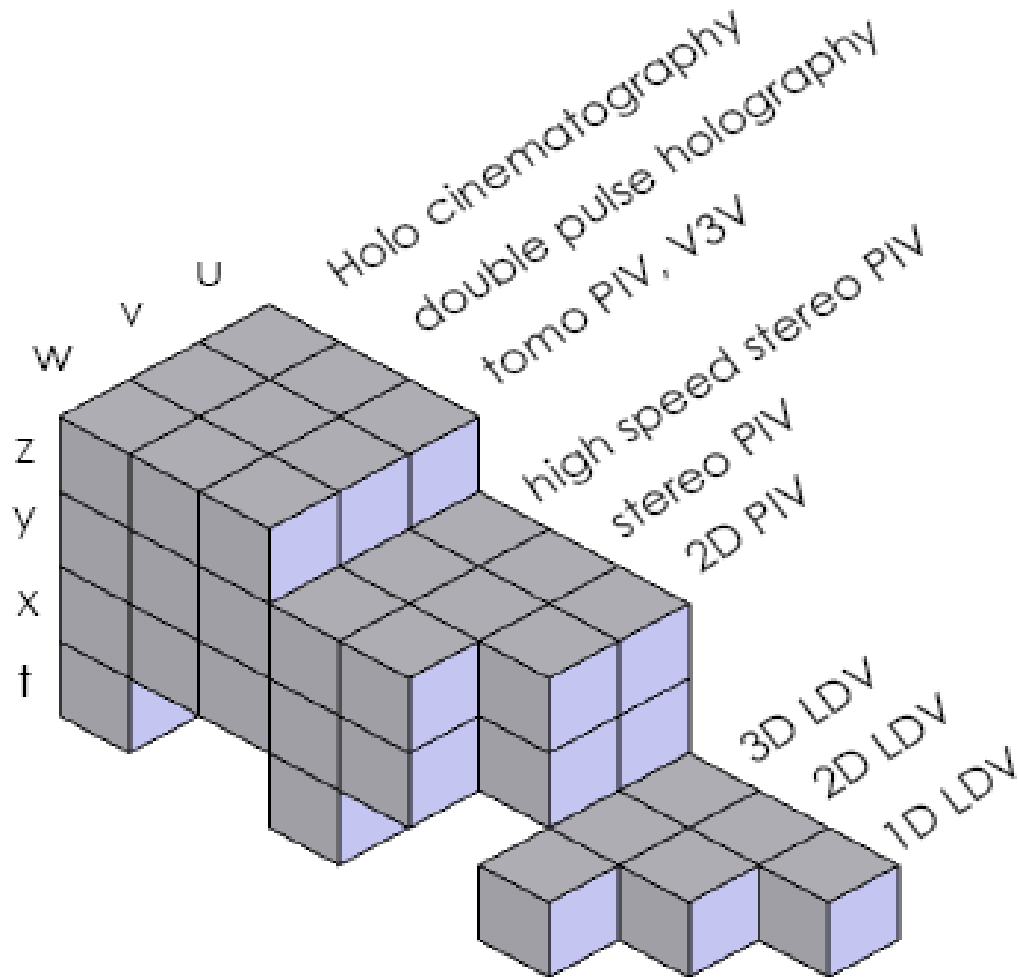
$$w(x, y, z)$$

$$\vec{\nabla} \vec{u} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{\partial v}{\partial x} & \frac{\partial w}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} & \frac{\partial v}{\partial y} & \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial z} & \frac{\partial v}{\partial z} & \frac{\partial w}{\partial z} \end{bmatrix}$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{u} = \left[ \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \right] \hat{e}_x + \left[ \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \right] \hat{e}_y + \left[ \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right] \hat{e}_z$$

# Summary of Measuring Techniques

(Prof. Tropea)



# Comentários Finais

- PIV é uma técnica de medição bem estabelecida que fornece campos instantâneos de velocidade e outras quantidades cinemáticas de interesse, em regiões extensas do escoamento
- Resolução espacial e incerteza obtidas são da mesma ordem das técnicas pontuais
- Resolução temporal ainda está limitada pela tecnologia das câmeras digitais disponíveis
- Técnicas para medição de escoamentos 3D em regiões 2D já estão disponíveis comercialmente
- Medições 3D em regiões 3D realizadas em laboratórios de pesquisa



# Comentários Finais

- PIV deve continuar a ser usado em conjunto com as técnicas pontuais de medição
- Rápido desenvolvimento da imagem eletrônica e poder de computação devem baratear os custos dos sistemas PIV
- Uma ampla faixa de aplicações com níveis de velocidade intermediária pode ser medida usando sistemas de baixo custo desenvolvidos em nossos laboratórios