

## INTRODUÇÃO

- A percepção de um processo físico é sempre melhorada quando o padrão produzido ou relacionado a este processo pode ser observado visualmente.
- Essa é uma visão geral que vale para diversas áreas, mas que é especificamente relevante no caso de investigações envolvendo fluidos, pois através da visualização é possível ter-se uma ideia das estruturas presentes no escoamento e no seu desenvolvimento.
- O conhecimento prévio dessa estrutura básica do escoamento é bastante importante como referência para o desenvolvimento de teorias, medições e simulações. Além disso a visualização pode auxiliar também na escolha da técnica adequada para a medição de grandezas do fenômeno relacionado ao escoamento

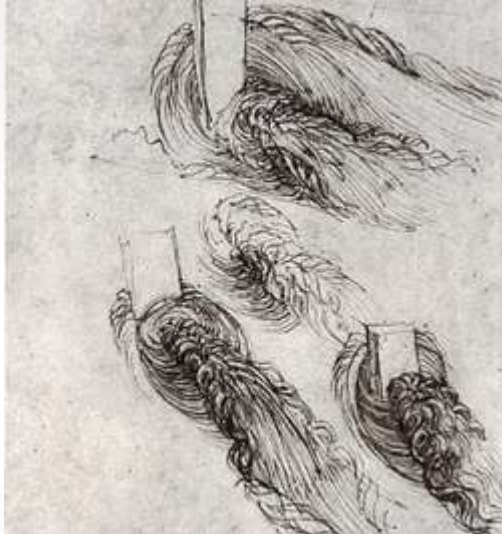
## INTRODUÇÃO

- A técnica de visualização em fluidos consiste em tornar visíveis a dinâmica do escoamento para um observador.
- Uma vez que a maioria dos fluidos utilizados em medições são homogêneos, o seu movimento não é detectado por observação direta do escoamento.
- Técnicas de visualização sempre foram importantes para o entendimento de problemas da mecânica dos fluidos.
- Elas são empregadas desde o início das investigações em mecânica dos fluidos que vem desde os tempos de Leonardo da Vinci passando por Osbourne Reynolds, Ludwig Prandtl e continuam sendo importantes até os dias de hoje.

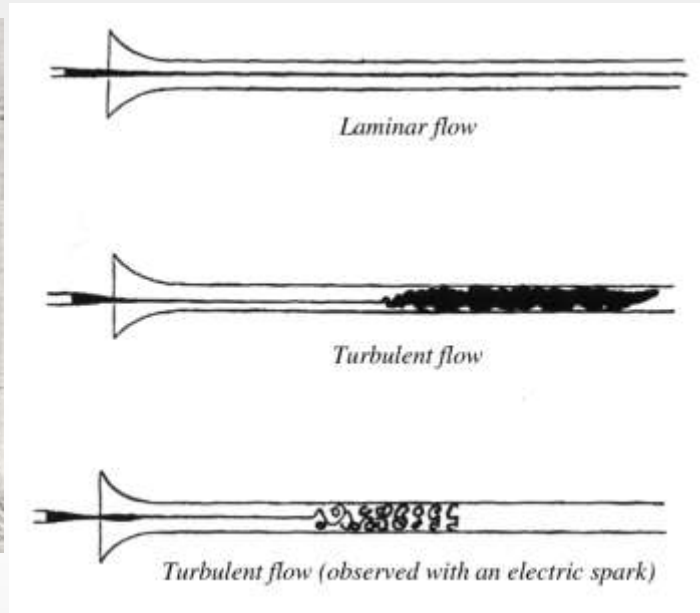
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

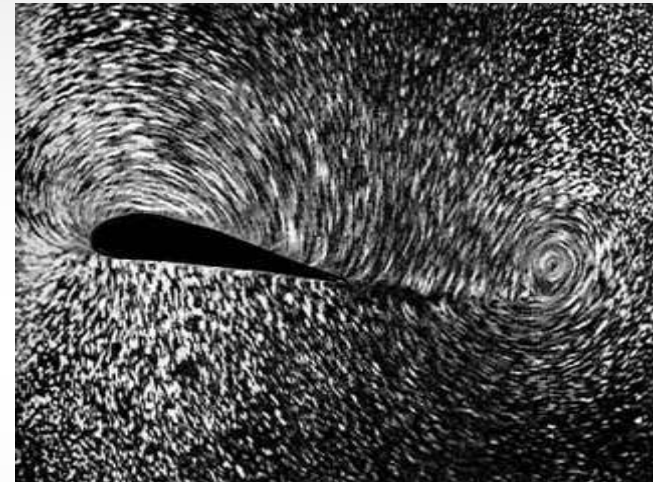
## ➤ INTRODUÇÃO



Desenho da topologia do escoamento na esteira de um obstáculo ( L. Da Vinci )



Desenho da topologia do escoamento em tubo ( O. Reynolds)



Visualização do escoamento em um aerofólio (vórtice de início, L. Prandtl)

## ➤ DEFINIÇÕES

➤ Para auxiliar na definição desses conceitos vamos assumir um sistema de coordenadas referenciado pela partícula, também conhecido como coordenadas Lagrangianas. Nesse sistema a velocidade de uma partícula do escoamento pode ser descrita como sendo:

$$\vec{u}_p(r_p, t) = \frac{dr_p}{dt}$$

onde  $r_p = r(x_p, y_p, z_p)$  é a coordenada espacial referente à localização da partícula,  $u_p = u(u_p, v_p, w_p)$  é a velocidade desta partícula e  $t$  o tempo

## ➤ DEFINIÇÕES

**Trajatória:** é definida como a curva descrita por uma determinada partícula de fluido durante um intervalo de tempo. Equivale a introduzir uma partícula tratadora em um ponto e gravar o caminho realizado por ela.

Se soubermos a função da equação da velocidade da partícula a sua trajetória pode ser construída através da relação da equação abaixo:

$$r_p = \int_{t_0}^t \vec{u}_p dt + r_0$$

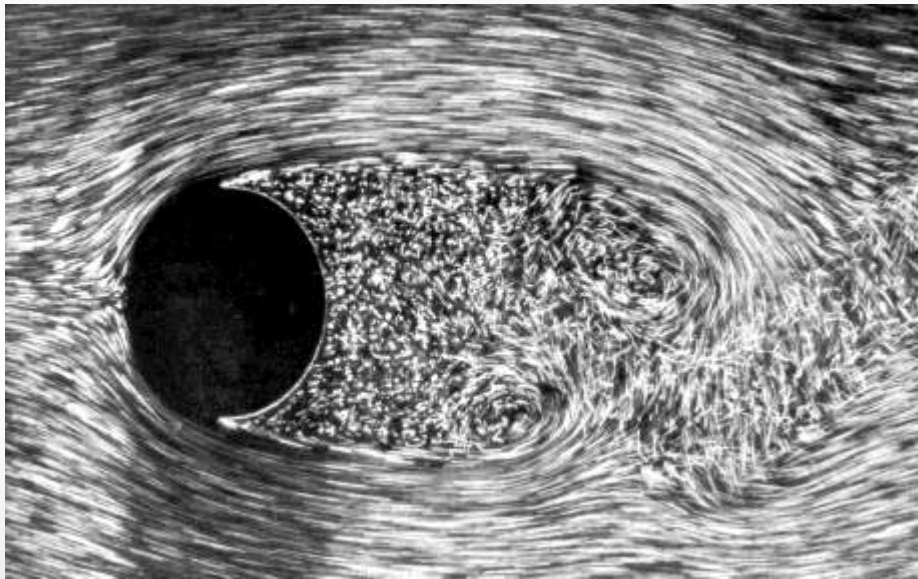
Na prática é possível estimar a trajetória utilizando-se partículas traçadoras e observando o escoamento através de fotos de longa exposição

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

### Trajectoria:



Escoamento na esteira de um cilindro ( $Re \gg 1$ )

Na prática é possível estimar a trajetória utilizando-se partículas tracadoras e observando o escoamento através de fotos de longa exposição

## ➤ DEFINIÇÕES

**Linhas de corrente** : são curvas tangenciais ao vetor de velocidade do escoamento em todos os pontos do domínio. Em outras palavras, se fizermos um desenho bidimensional dos vetores do campo de velocidades para um instante de tempo, estes vetores serão tangenciais as linhas de corrente.

Nesse caso as coordenadas Lagrangianas não são importantes, pois as linhas de corrente não dependem de partículas, mas do campo de velocidade do escoamento. A relação que descreve as linhas é dada pela equação abaixo:

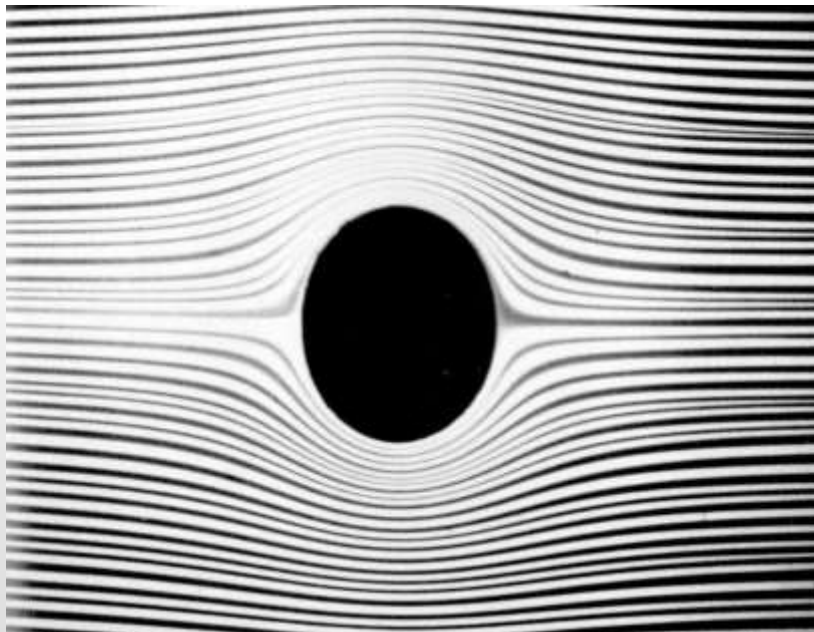
$$\frac{dy}{dx} = \frac{v(r,t)}{u(r,t)}; \quad \frac{dz}{dx} = \frac{w(r,t)}{u(r,t)}$$

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

**Linhas de corrente** : são curvas tangenciais ao vetor de velocidade do escoamento em todos os pontos do domínio. Em outras palavras, se fizermos um desenho bidimensional dos vetores do campo de velocidades para um instante de tempo, estes vetores serão tangenciais as linhas de corrente.



Escoamento ao redor de um cilindro ( $Re \ll 1$ )



# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

**Linhas de tinta:** correspondem ao caso onde se injeta partículas traçadoras continuamente em um ponto qualquer do espaço. Nesse caso várias partículas são convectadas pelo escoamento, cada uma seguindo uma trajetória de acordo com o campo de velocidades instantâneo do escoamento.

A representação dessas curvas é dada por uma relação similar a trajetória, só que no caso da linha de tinta ela representa o conjunto de posições instantâneas de várias partículas cada uma introduzida no escoamento no instante de tempo  $\tau$ :

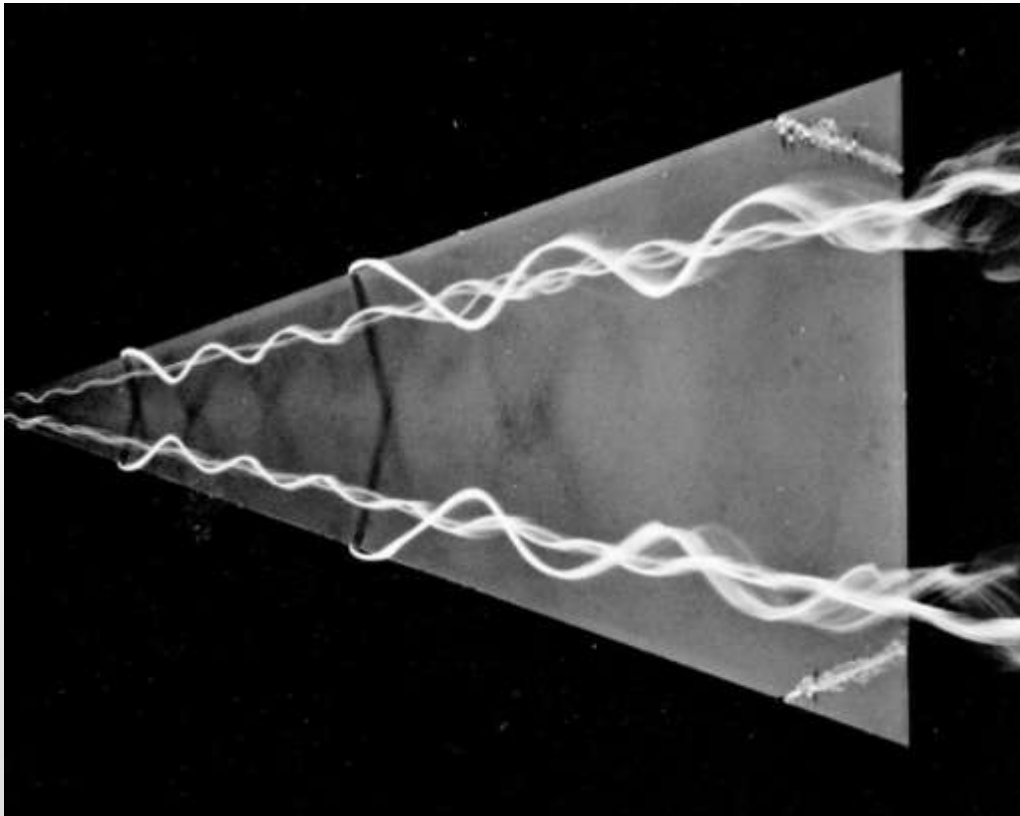
$$r_{\tau} = \int_{\tau}^t \vec{u}_P(r, \tau, t) dt + r_0$$

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

**Linhas de tinta:** correspondem ao caso onde se injeta partículas traçadoras continuamente em um ponto qualquer do espaço.



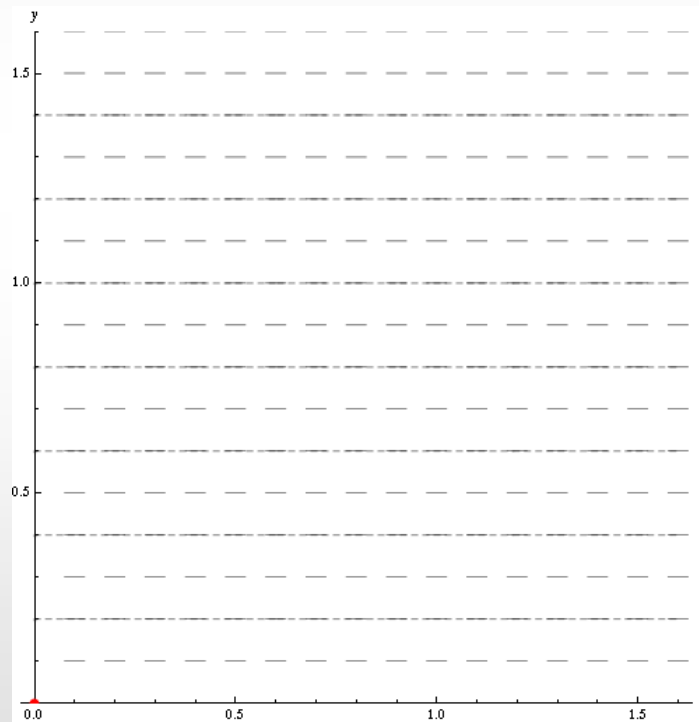
Escoamento uma asa delta

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

Comparativo entre trajetória (vermelho), linha de corrente (pontilhado) e linha de tinta (azul):

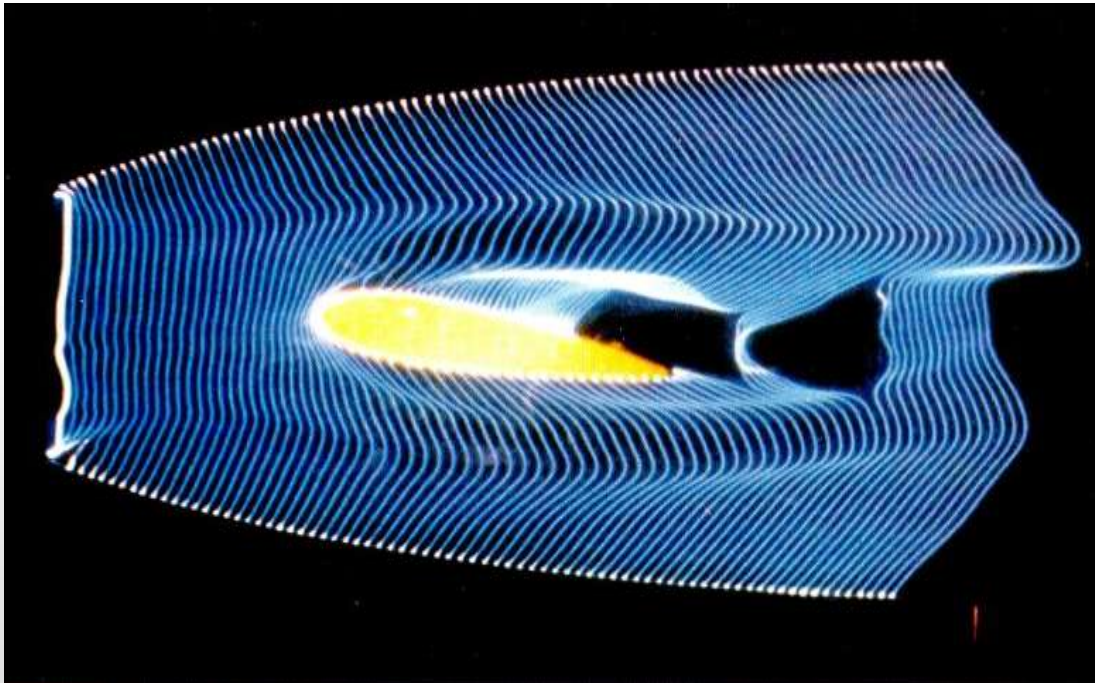


# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## ➤ DEFINIÇÕES

Existe também o conceito de linha de tempo, que é dado por um conjunto de partículas traçadoras injetadas no escoamento ao longo de uma linha e em um intervalo de tempo bastante curto. Desse modo a deformação da linha de partículas dá um indicativo do perfil de velocidades ao longo da linha.



Escoamento em um aerofólio  
NACA0012

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

---

## ➤ DEFINIÇÕES

Dentre os conceitos apresentados o que é mais comum é o de linha de tinta. Isso se deve ao fato de que ele é o mais facilmente implementado nas visualizações.

Em escoamentos estacionários a trajetória, a linha de corrente e a linha de tinta coincidem. Nesses casos o entendimento e a quantificação do campo de velocidades através de visualizações são mais simples

## ➤ TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ Freqüentemente a estrutura do escoamento que se deseja observar está relacionada com escoamento sobre um corpo ou superfície. Sabe-se que dependendo da geometria do corpo o escoamento pode estar sujeito a separação da camada limite. O comportamento da separação está intimamente ligado a sua formação.

➤ Baseado nesse princípio alguns pesquisadores buscaram conhecer as estruturas geradoras de separação, denominadas singularidades de separação.

➤ Referencias: *Wang, C. K. Features of three-dimensional separation and separated flow structure. In: . Flow at Large Reynolds Number. Cap.1, pg. 2-33, 1995.*

*Tobak, M., Peake, D. J. Topology of three dimensional separated flows. Annual review of fluid mechanics 14, pp 61-85, 1982.*

## ➤ TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

A idéia do estudo da topologia do escoamento não é de prever a separação (para isso é necessário resolver as equações de Navier-Stokes). O objetivo desses estudos é auxiliar no entendimento e interpretação das visualizações dos escoamentos (sejam elas experimentais ou numéricas).

➤ Singularidades de separação podem ser estudadas considerando um escoamento paralelo a superfície de um corpo. Desse modo a tensão de cisalhamento atuante nesta superfície pode ser escrita conforme a equação abaixo.

$$\frac{dx}{\tau_x(x, z)} = \frac{dz}{\tau_z(x, z)}$$

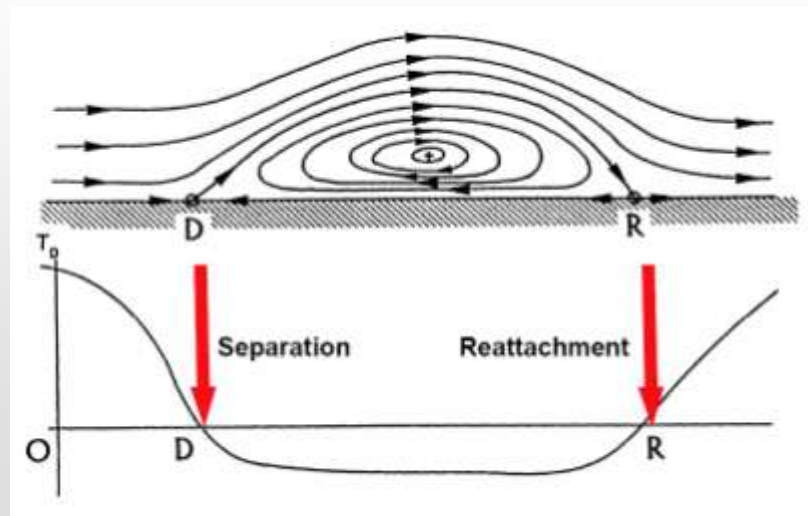
onde  $\tau$  é o vetor tensão de cisalhamento e os índices se referem às projeções deste vetor em cada eixo do plano XZ da superfície do corpo.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

- Existe um número infinito de curvas que resolvem as equações das tensões de cisalhamento na superfície e geralmente as curvas não se cruzam. Nos locais onde essas curvas se cruzam ocorre a formação de pontos singulares. Nestes pontos ocorre a separação do escoamento.
- No caso 2D somente o cisalhamento em uma coordenada é considerado. Assim, regiões de separação ou recolamento correspondem a locais onde a tensão de cisalhamento é nula.



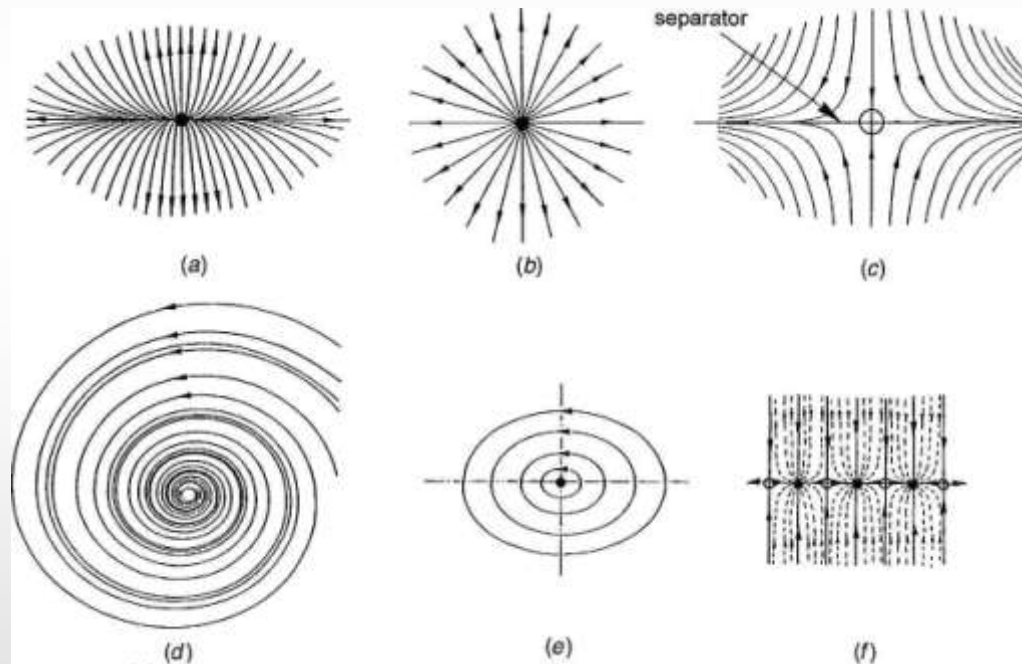


# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ A partir do estudo teórico do comportamento das soluções das equações em locais próximos a pontos críticos foram criados padrões típicos de separação tridimensionais e alguns são mostrados a seguir:



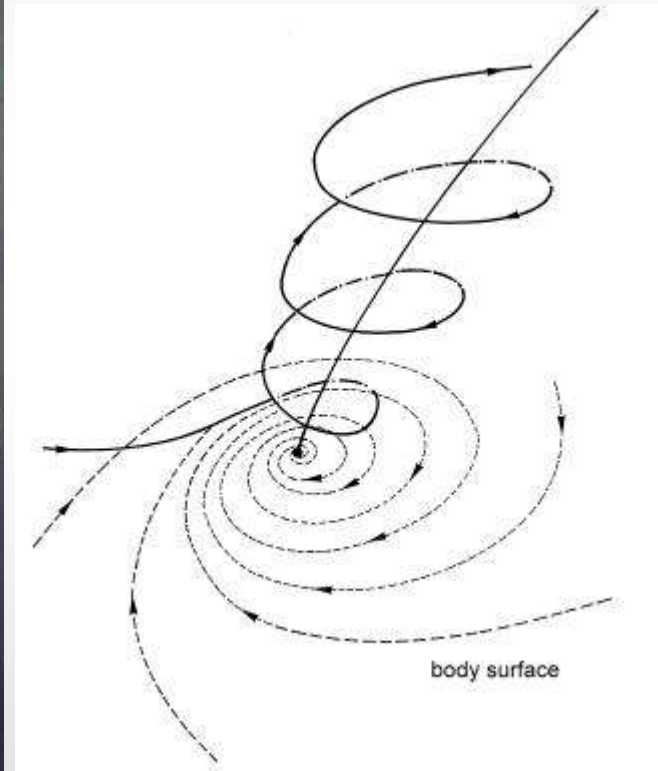
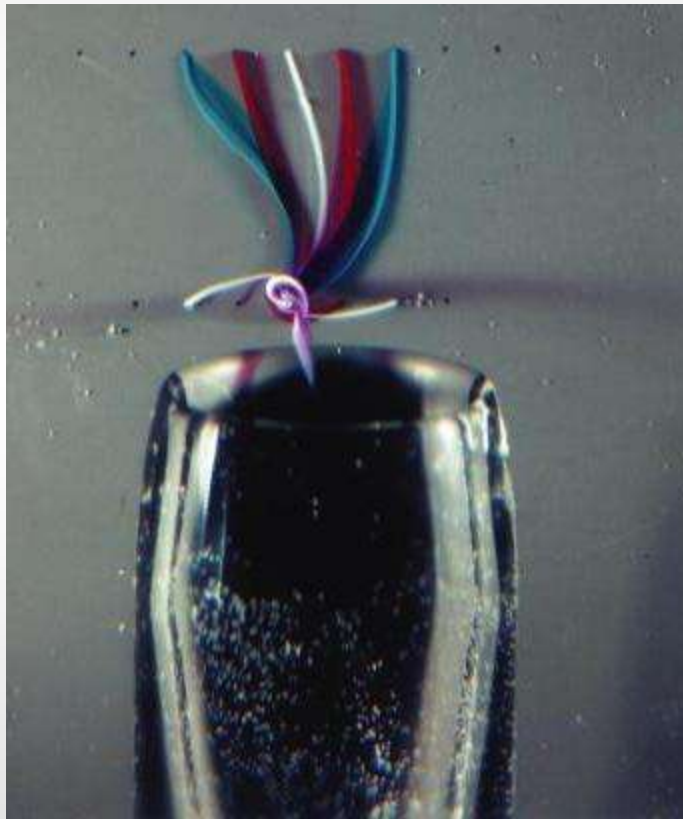
a) Recolamento em um nó; b) nó isotrópico, c) descolamento puntual;  
d) foco; e) centro de vórtice; f) combinação de separação e recolamento

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ Exemplo:



Visualização e topologia do escoamento (foco) na esteira de um cilindro com sucção.

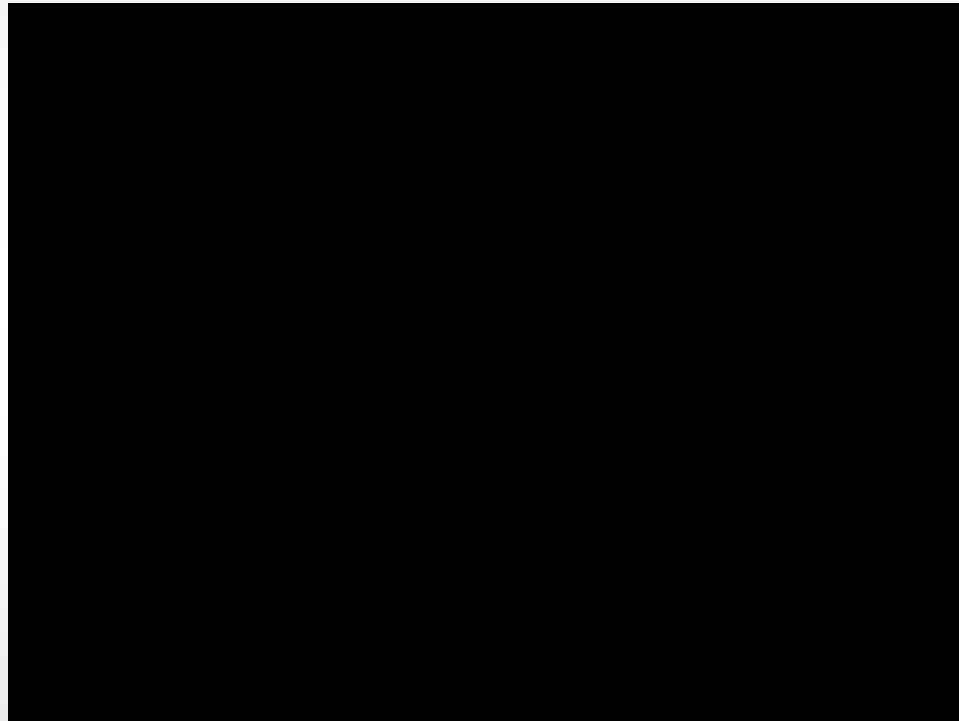
# Visualização de escoamentos

I.B De Paula

---

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ Exemplo:



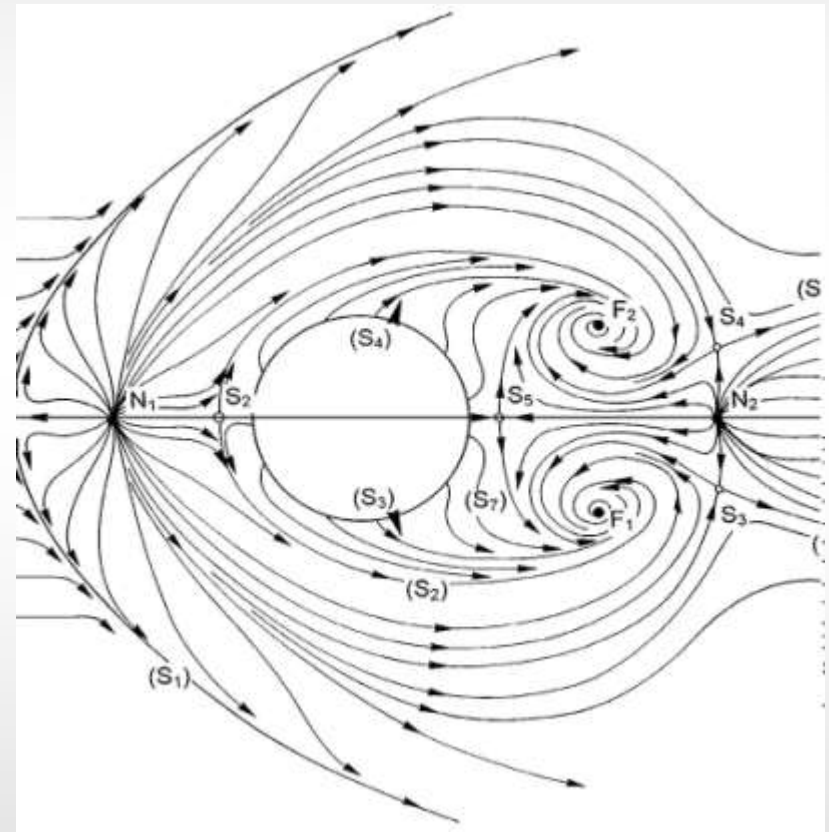
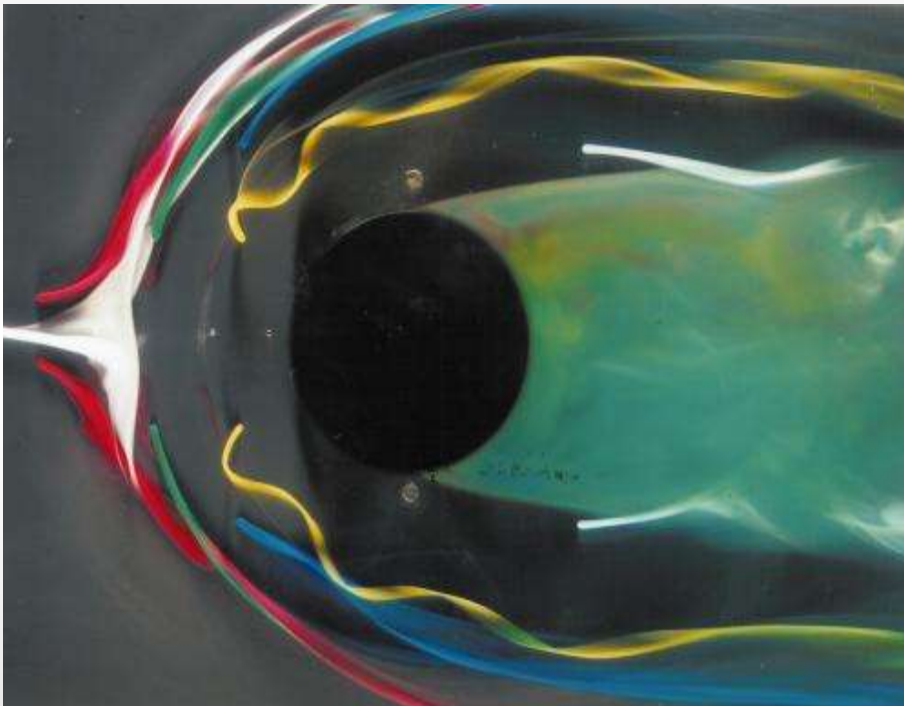
Visualização do escoamento de um cilindro vertical sobre uma placa plana.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ Exemplo:



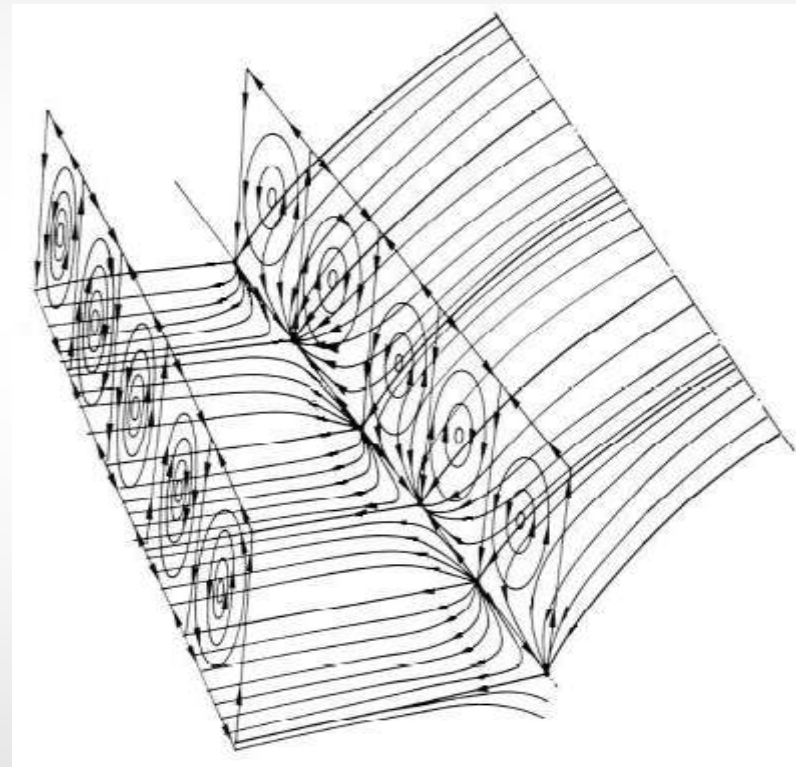
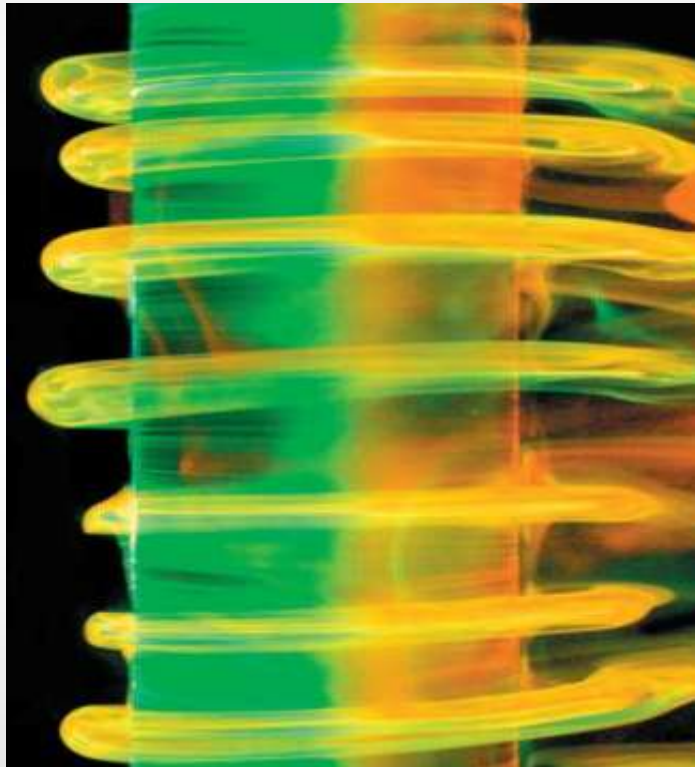
Visualização e topologia do escoamento de um cilindro vertical sobre uma placa plana.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## TOPOLOGIA DE ESCOAMENTO

➤ Exemplo:



Visualização e topologia do escoamento em uma placa com curvatura não constante (vórtices de Goertler).

# Visualização de escoamentos

I.B De Paula

---

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO

Existem diversas técnicas de visualização de escoamentos, mas para fins didáticos é possível separá-los de acordo com a o fluido estudado. Assim os métodos ficam divididos em:

- Métodos para visualização de gases.
  
- Métodos para visualização de líquidos.

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO

- Os métodos para visualização de gases: tiveram o desenvolvimento bastante impulsionado pela pesquisa aeronáutica. Devido à necessidade de compreensão do comportamento das aeronaves foram criadas técnicas para observação do escoamento junto a sua superfície e ao seu redor.
- Algumas dessas técnicas são aplicadas para ensaios em túneis de vento e em vôo.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

Tufos de lã : é uma das técnicas mais simples e intuitivas. A técnica consiste em afixar fios flexíveis na superfície do corpo que se deseja estudar.

- Os tufos devem ser constituídos de um material leve e flexível de modo a permitir que ele se alinhe com a direção do escoamento, dentre os materiais utilizados a lã é um dos mais comuns.
- As dimensões do tufo variam de acordo com a velocidade do escoamento e tamanho do modelo. Dependendo do seu tamanho os tufos podem influenciar o escoamento na superfície do modelo.
- Tufos muito pequenos produzem pouca reflexão de luz, nesses casos pode-se utilizar tinta fluorescente sobre os tufos para garantir uma boa visualização do escoamento.

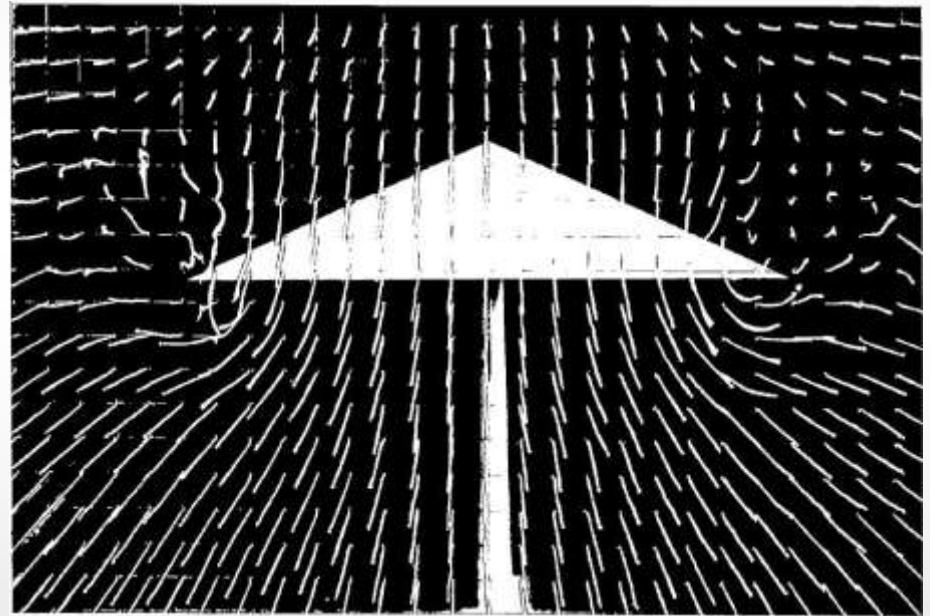


# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Tufos de lã :



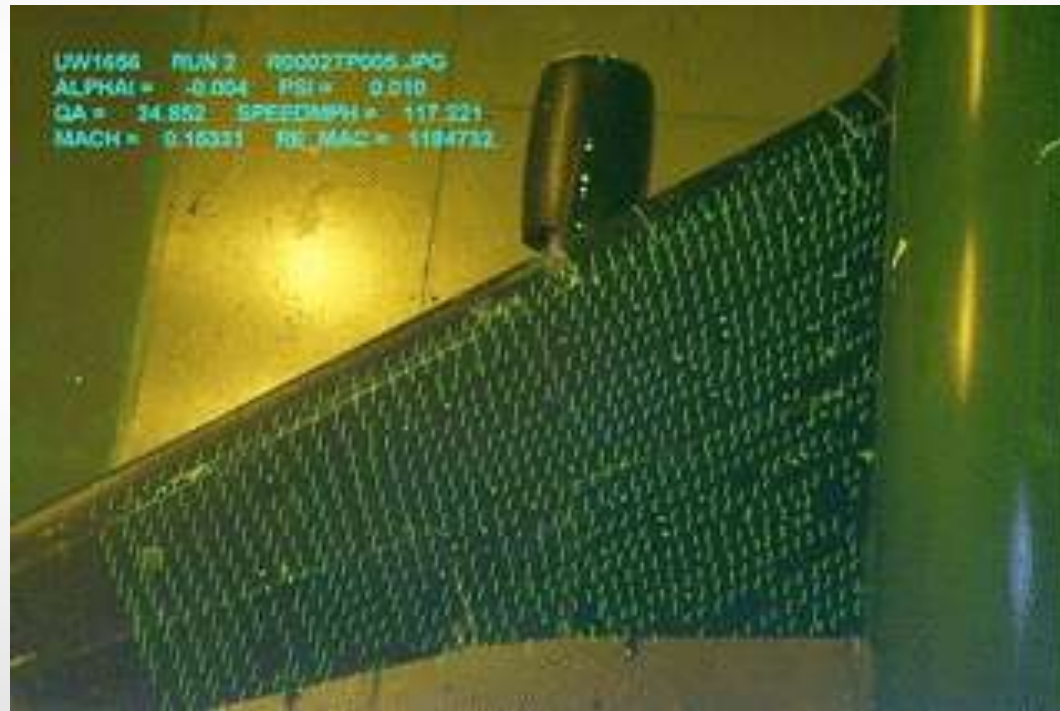
Visualização com tufos de lã. A figura da esquerda mostra uma visualização na superfície de um modelo e a da direita mostra uma esteira. Extraído de NACA TN2674

# Visualização de escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Tufos de lã :



Visualização do escoamento na asa de um modelo utilizando tufos lã.

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Óleo negro de fumo: assim como a técnica dos tufo é bastante comum. Nesta técnica recobre-se a superfície do modelo com uma mistura de óleo com negro de fumo. A tensão de cisalhamento gerada pelo escoamento desloca a mistura fazendo aparecer o padrão do escoamento.

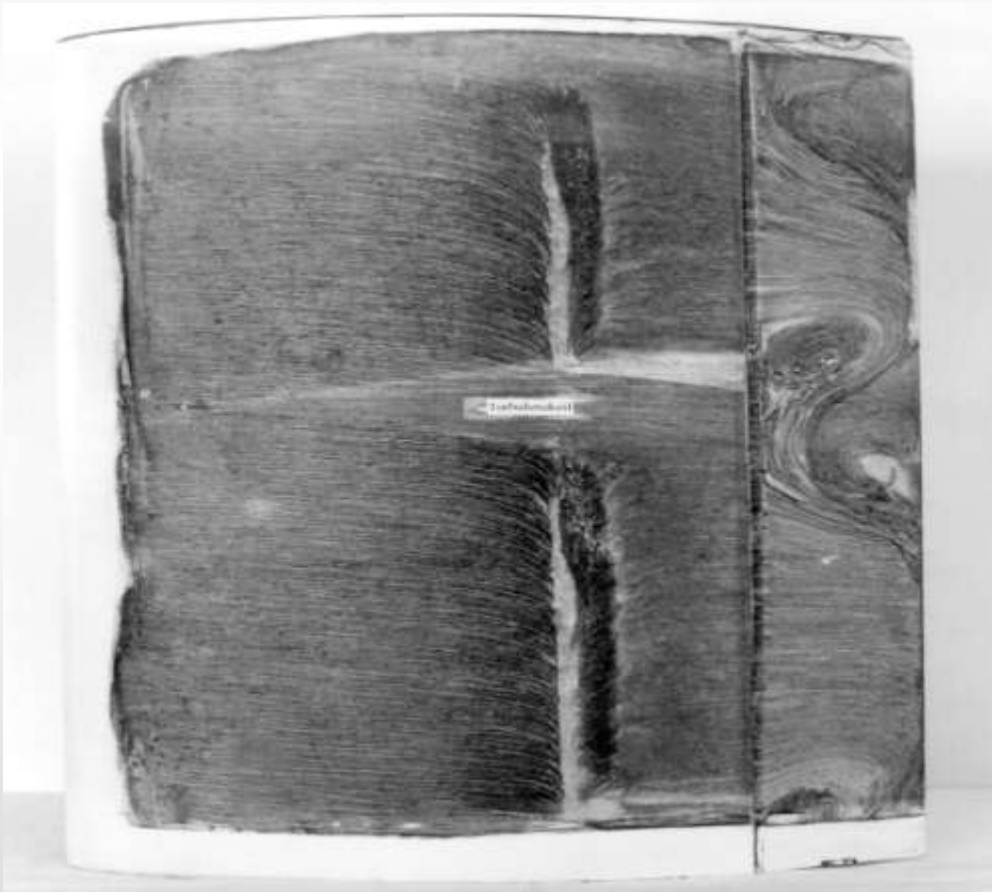
- Para este tipo de visualização utilizam-se óleos com viscosidade suficientemente grande de modo a evitar que a mistura escorra rapidamente depois de aplicado na superfície do modelo. No entanto, a viscosidade não pode ser demasiadamente alta, pois isso impede que o cisalhamento do escoamento imprima um escoamento ao óleo.
- Não é muito indicado para escoamentos de muito baixa velocidade, pois nesses casos a tensão cisalhante é muito baixa e fica difícil ajustar uma viscosidade ideal da mistura

# Visualização de escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Óleo negro de fumo:



Visualização do escoamento na asa de um modelo com óleo negro de fumo.

# Visualização de Escoamentos

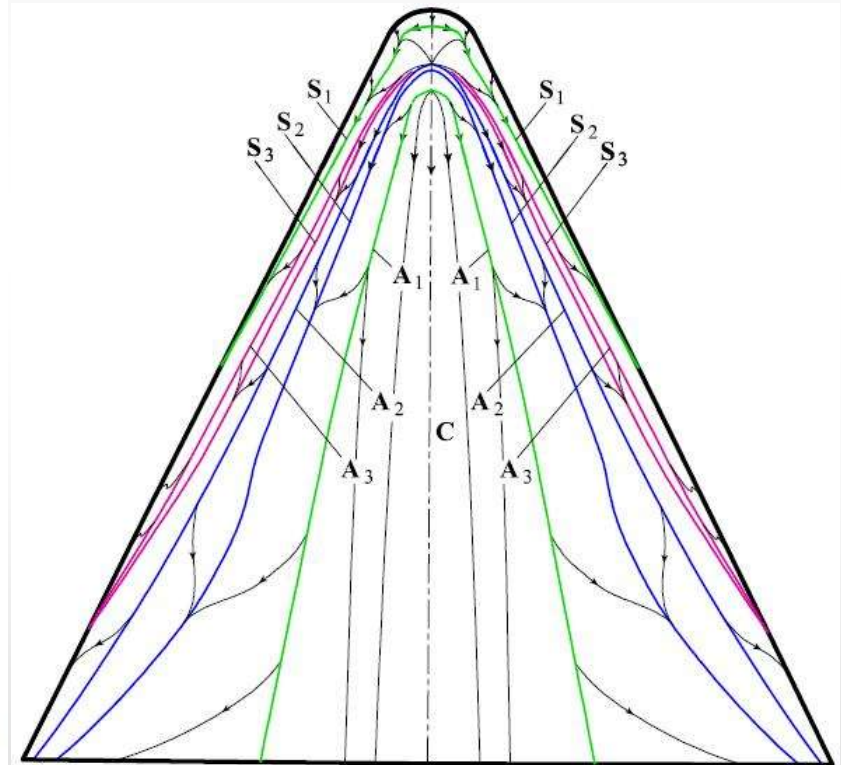
I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Óleo negro de fumo:



Visualização do escoamento em uma asa delta com óleo negro de fumo.

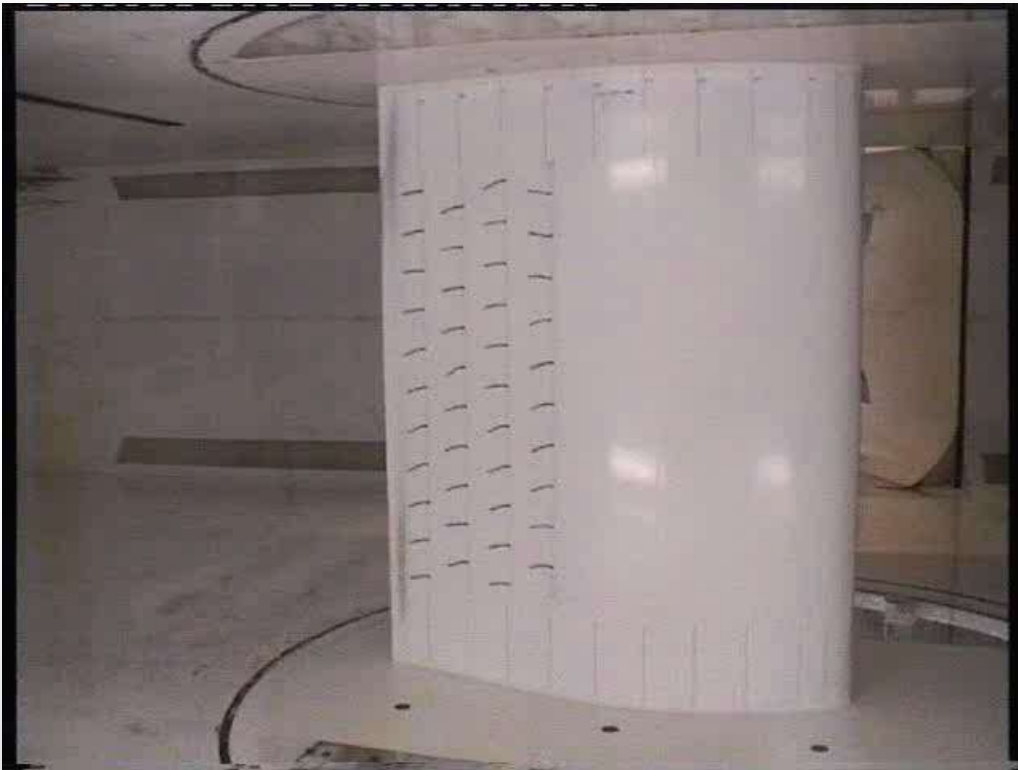


Topologia do escoamento obtida a partir da visualização com óleo negro de fumo.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES



Visualização do escoamento na asa de um modelo com tufos de lã e óleo negro de fumo.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

Naftaleno: A técnica de visualização com naftaleno foi desenvolvida com o intuito de permitir a observação da transição. Nessa técnica aplica-se sobre a superfície do corpo uma mistura de naftaleno com um solvente.

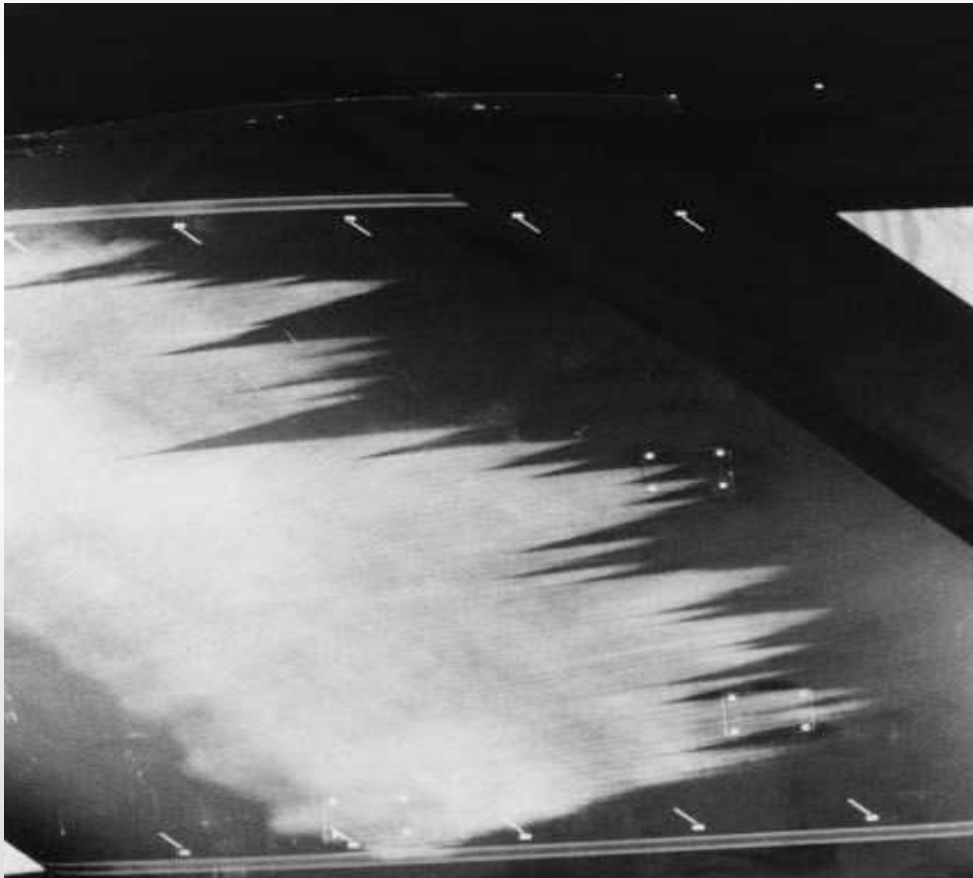
- O princípio da técnica é baseado variação da taxa de sublimação do naftaleno de acordo com o taxa de transferência de calor entre o fluido e a superfície. Assim regiões de escoamento turbulento, que possuem maior velocidade próxima a superfície apresentam uma maior taxa de sublimação do naftaleno do que regiões de escoamento laminar.
- As técnicas de visualização através de tufo e óleos não fornecem com clareza informações acerca do local onde ocorre a transição do escoamento laminar para turbulento. Para várias aplicações, essa informação é importante e o seu conhecimento facilita o entendimento da estrutura do escoamento na superfície do modelo .

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Naftaleno:



Visualização da transição do escoamento na asa de um modelo utilizando a técnica de naftaleno.

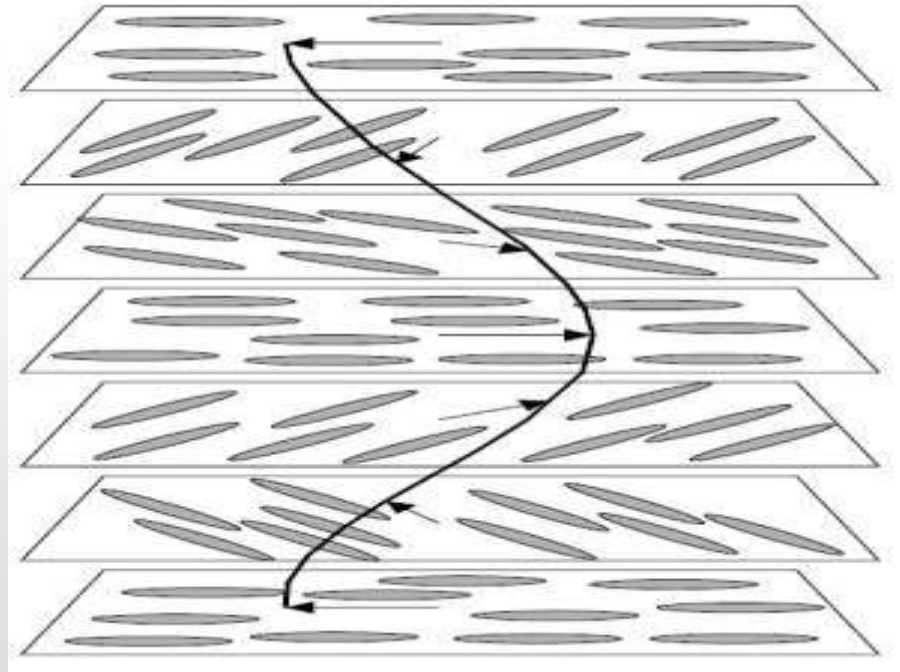


# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Cristal Líquido: Alguns cristais líquidos possuem a capacidade de refletir diferentes comprimentos de onda, de acordo com a tensão de cisalhamento na sua superfície. Desse modo pode-se inferir a orientação do escoamento em uma superfície a partir do comprimento da onda refletida. A figura abaixo exemplifica o processo:



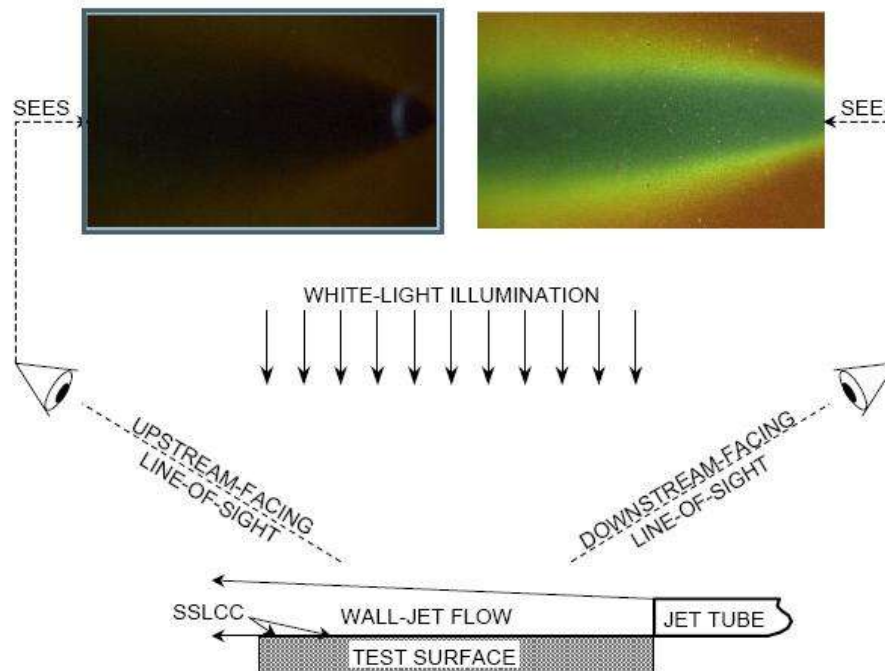
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Cristal Líquido:

- A variação do índice de refração pode ser associada também com mudanças de temperatura no filme de cristal líquido.
- A repetibilidade do processo permite a calibração das cores emitidas pelo filme e até a quantificação dos resultados.



Visualização do escoamento em um jato paralelo a uma placa através da utilização de cristal líquido.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

Termografia: A técnica da termografia utiliza o mesmo princípio da sublimação de naftaleno, onde regiões de escoamento turbulento e laminar apresentam diferentes taxas de transferência de calor .

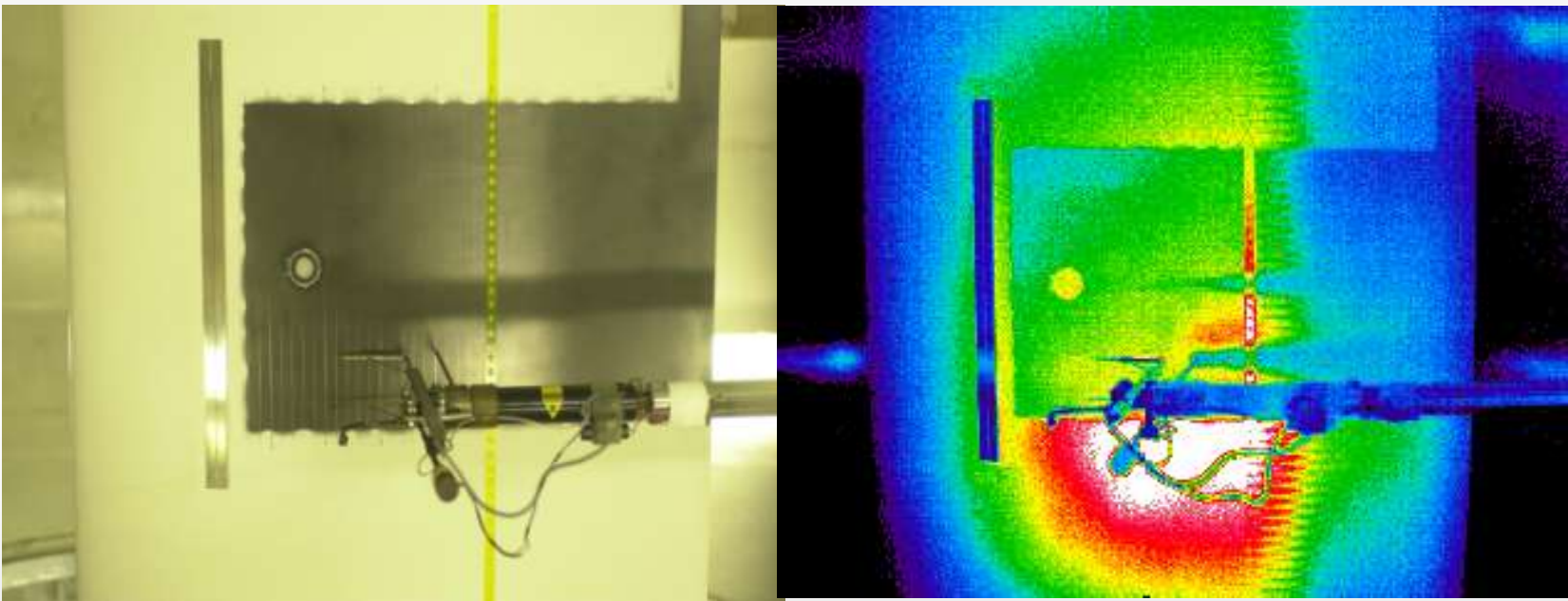
- O procedimento utilizado nesta técnica consiste no prévio aquecimento do modelo a uma temperatura maior do que a do fluido do escoamento. Depois de aquecido o modelo é inserido no escoamento, e após um tempo de estabilização observa-se distribuição de temperatura ao longo da superfície do modelo .
- É utilizada para a visualização da localização da frente de transição do escoamento.
- Para velocidades supersônicas o próprio escoamento confere um gradiente de temperatura na superfície do modelo devido à presença de ondas de choque.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Termografia:



Visualização da transição do escoamento na asa de um modelo utilizando a técnica de termografia.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

Tinta sensível a pressão (Pressure Sensitive Paint –PSP): O método é baseado na variação da irradiação de luz de algumas moléculas fluorescentes na presença de oxigênio. A razão entre a emissão de luz em diferentes partes do modelo acaba sendo uma função da concentração de oxigênio na superfície desse modelo.

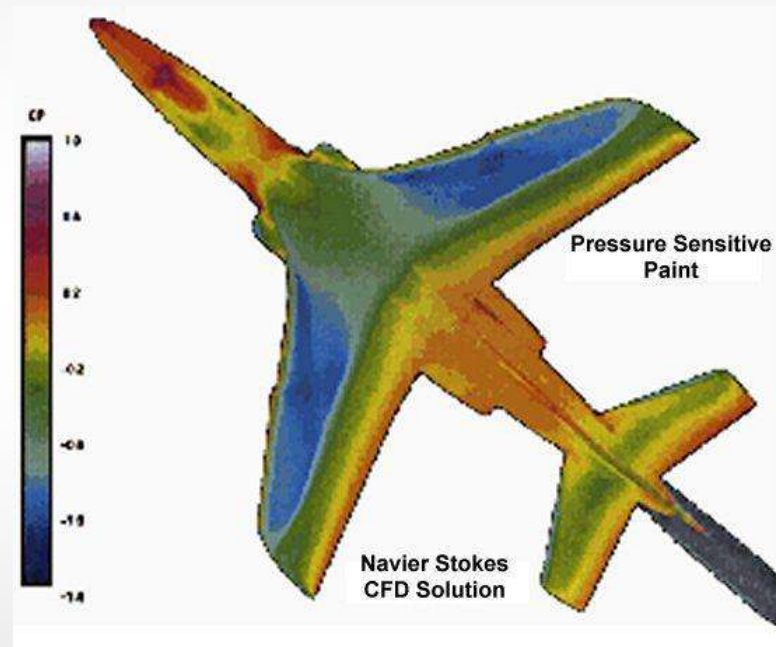
- No caso convencional onde se utilizam tomadas de pressão é possível obter informação de pressão somente nos pontos onde as tomadas são colocadas, já no método da tinta sensível a pressão toda superfície do modelo pode ser resolvida.
- A fluorescência das partículas também é sujeita a variações de temperatura e concentração de oxigênio do ar, portanto fica difícil de se obter grande resolução. Por isso ele é mais aplicado em casos onde há elevadas diferenças de pressão no corpo, como no caso de escoamentos com alta velocidade.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Tinta sensível a pressão (Pressure Sensitive Paint –PSP):



Campo de pressão em uma aeronave obtido através de simulação numérica CFD (esquerda) e PSP (direita).

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

Injeção de fumaça: fornece informação sobre o comportamento do escoamento longe de superfícies, como é o caso de esteiras, escoamentos cisalhantes, vórtices, dentre outros.

- A geração de fumaça pode ser feita de diversas formas, dentre as mais comuns pode-se citar a queima de material inflamável, a vaporização de óleos e a vaporização de produtos químicos.
- Os métodos descritos até aqui, com exceção da malha de fios de lã, tratam da visualização do escoamento na superfície dos corpos.
- A fumaça gerada normalmente é uniformizada em uma câmara onde a sua temperatura é resfriada para evitar o movimento ascendente da corrente de fumaça devido à diferença de densidade em relação ao ar.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

### Injeção de fumaça:

- Produz partículas muito pequenas e com baixa capacidade de refração da luz. Portanto requer uma boa iluminação para permitir uma visualização clara do escoamento .
- A vaporização de óleos é uma alternativa muito empregada para a geração de fumaça. Nesse caso utiliza-se um filamento aquecido eletricamente por uma corrente DC para vaporizar o óleo.
- Nos casos onde se necessita de grande quantidade de fumaça a vaporização pode ser feita em um gerador externo e a fumaça inserida no escoamento através de pequenos tubos.
- No caso de vaporização de produtos químicos, os mais utilizados são o tetracloreto de titânio e o tetracloreto de estanho, mas existem outros. Esses produtos em contato com a humidade do ar produzem uma reação química que gera uma fumaça branca. A reação química envolve a formação de material corrosivo e tóxico devido à formação de HCl.



# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Injeção de fumaça



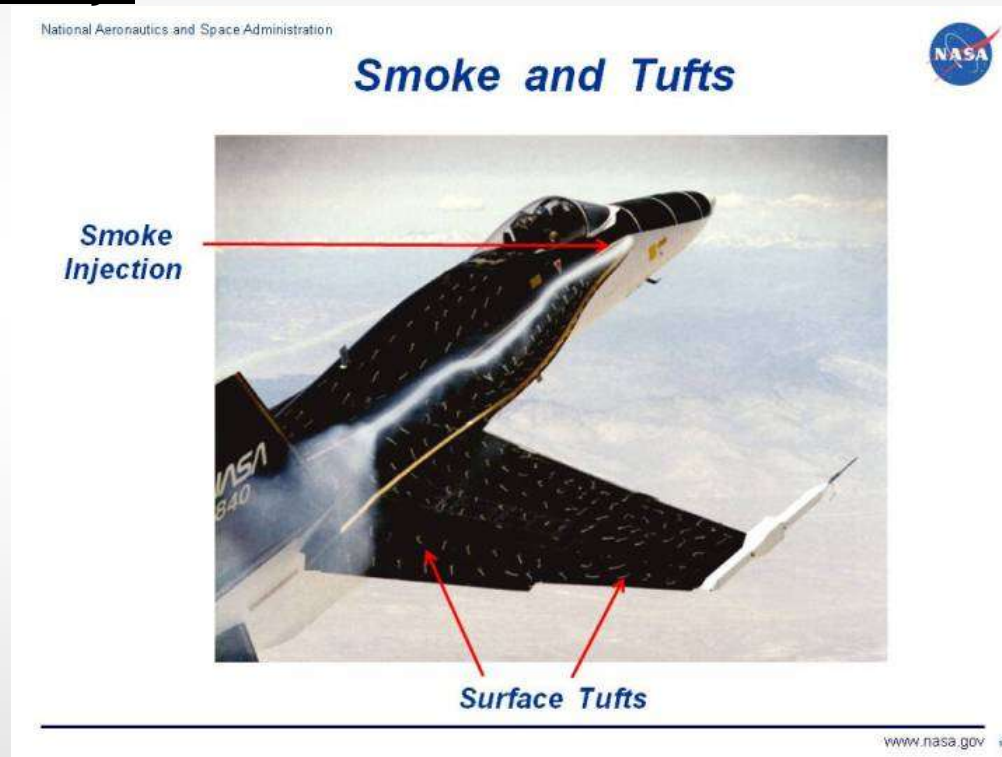
Visualização das linhas de corrente em um automóvel utilizando injeção de fumaça.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Injeção de fumaça



Ensaio em voo com visualização combinada utilizando tufos de lã e injeção de fumaça.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Injeção de fumaça



Observação dos vórtices gerados por um jato passando em uma formação de nuvens

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

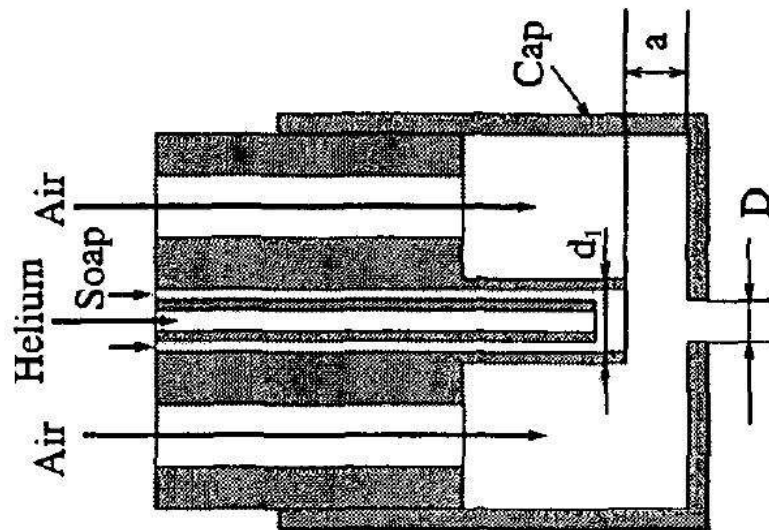
### Injeção de partículas sólidas:

- Os geradores de aerossóis são uma opção em relação aos geradores de fumaça. Neste caso, pequenas partículas sólidas ou líquidas são inseridas no escoamento ao invés de fumaça.
- Deve-se atentar para a fidelidade com que as partículas seguem o escoamento.
- Técnicas para medições quantitativas de velocidade foram desenvolvidas para este tipo de traçador, dentre as quais se pode citar a velocimetria por rastreamento de partícula (o nome mais conhecido é do termo em inglês Particle Image Tracking) e velocimetria por imagem de partícula (do inglês Particle Image Velocimetry- PIV). Essas técnicas serão abordadas em detalhe em outra aula.

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Visualização com bolhas de sabão com hélio:

- É uma técnica muito boa para baixas e altas velocidades, sendo bastante empregada em conjunto com algoritmos de rastreamento de partícula.
- Bolhas de sabão cheias de hélio podem ser produzidas com empuxo neutro e suficientemente grandes para produzir espalhamento de luz. O tamanho e densidade das bolhas podem ser controlados.



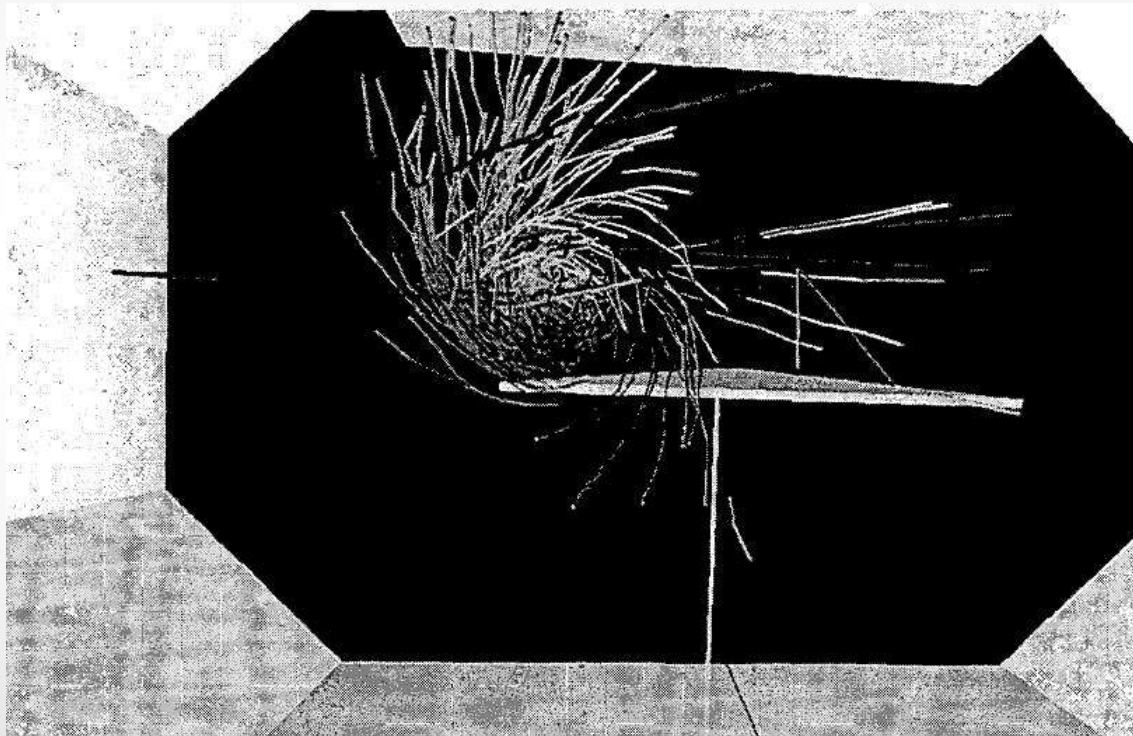
Desenho esquemático de um gerador de bolhas de sabão com hélio.

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Visualização com bolhas de sabão com hélio:



Visualização da trajetória de bolhas de sabão com hélio na esteira de uma asa delta.

## **MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES**

### **Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:**

- As técnicas são baseadas no princípio de variação do índice de refração da luz de acordo com a densidade do ar. Assim, feixes de luz que passam por um escoamento onde o ar apresenta diferentes densidades, vão sofrer deformações.
- As técnicas permitem observar onde essas deformações ocorrem e são bastante empregadas no estudo de escoamentos supersônicos.

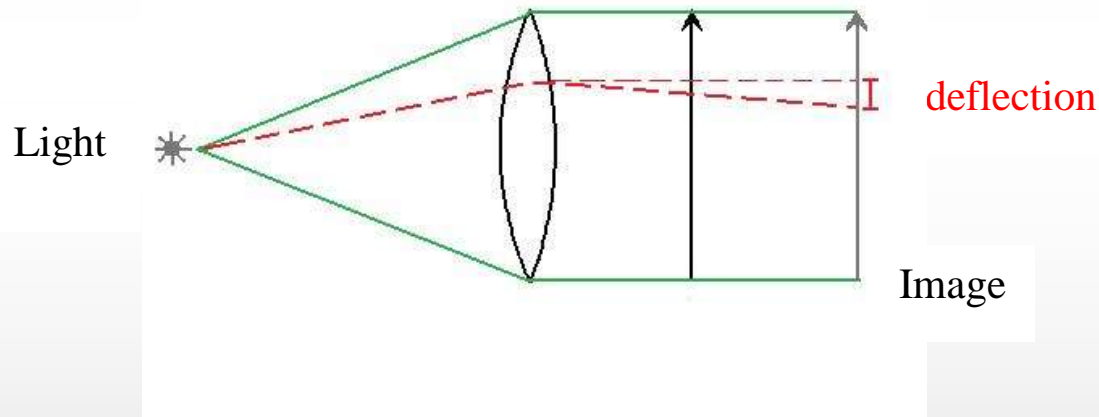
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ No caso do **Shadowgraph** o arranjo é mais simples e o desenho esquemático da figura abaixo ajuda a entender como funciona a técnica:



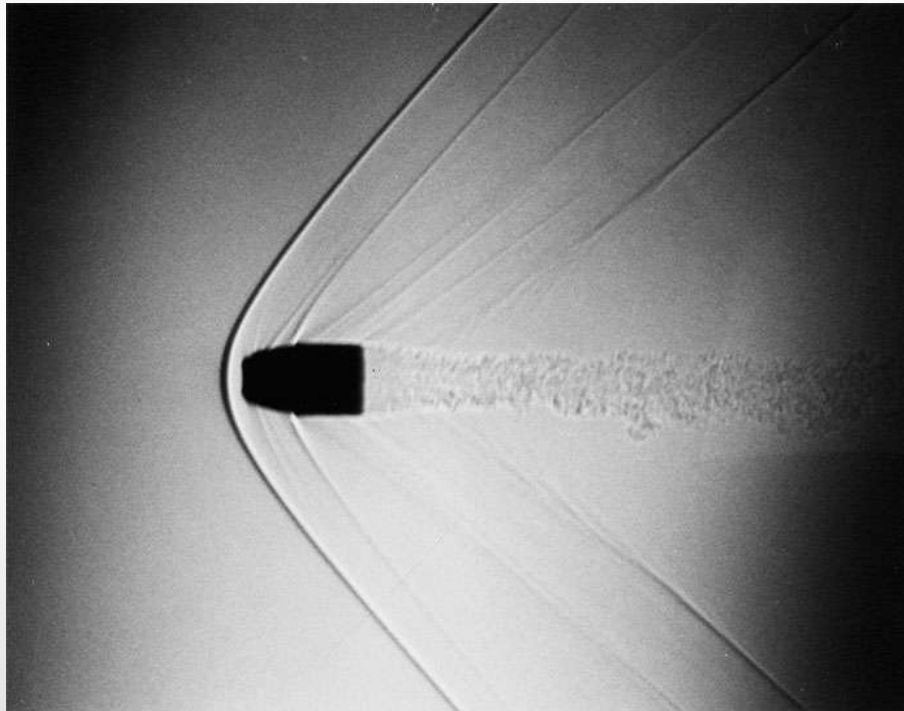
➤ Neste tipo de configuração a deflexão dos feixes produz locais com diferentes intensidades de iluminação, e permite que se observe variações na segunda derivada da densidade do escoamento



## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ Exemplo ***Shadowgraph***:



Visualização da onda de choque em um projétil.

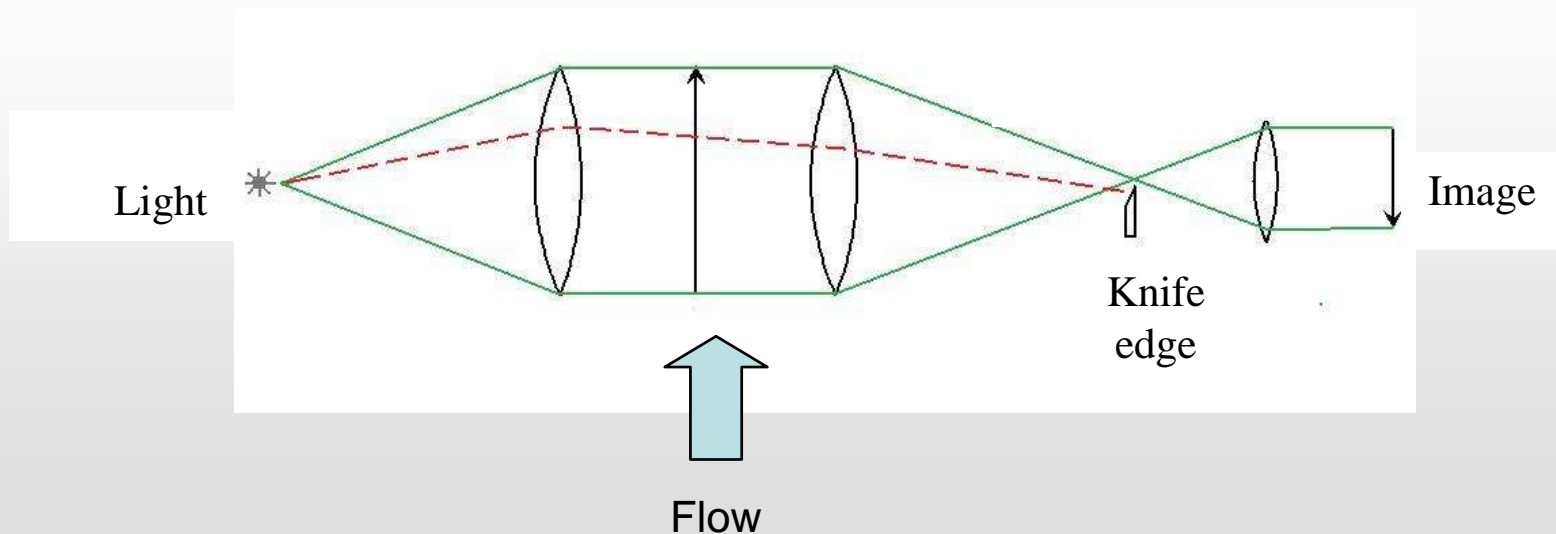
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ No método **Schlieren** uma lente (ou espelho côncavo) é utilizada para focar os feixes de luz que passaram pelo escoamento. Os feixes que não foram defletidos irão focar a uma distancia da lente (espelho). Nesse local coloca-se uma lamina bem próxima ao foco, de modo que parte dos feixes defletidos pelo escoamento são barrados. A imagem resultante fornece informações sobre a derivada da densidade do escoamento



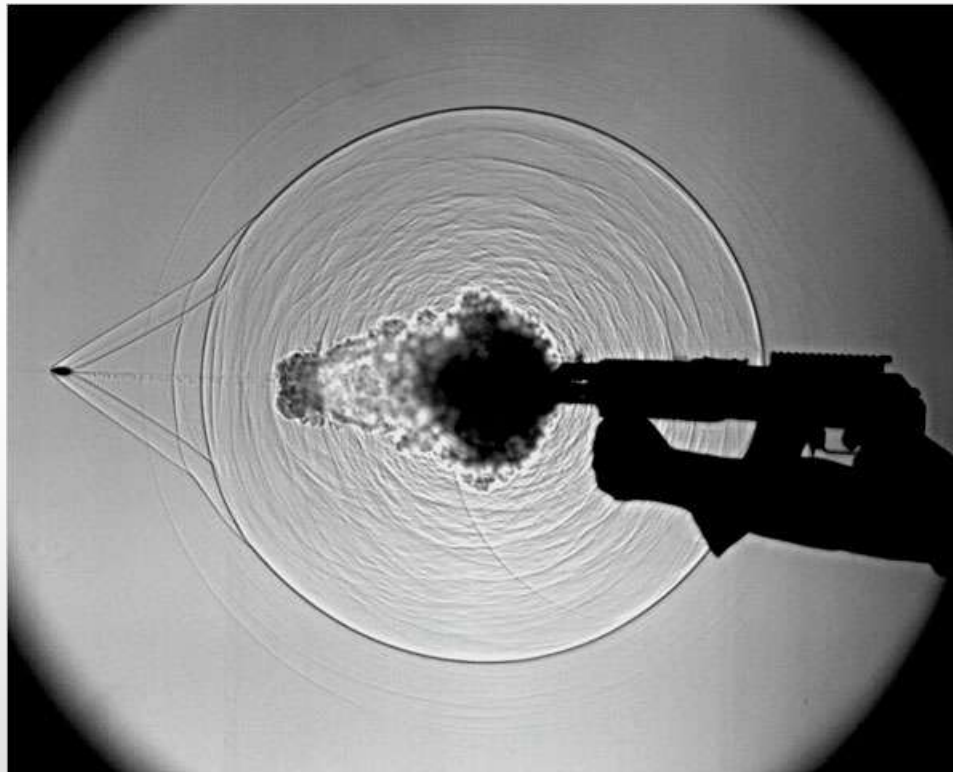
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ Exemplo **Schlieren**:



Visualização da onda de choque em um projétil e campo acústico gerado pelo disparo.

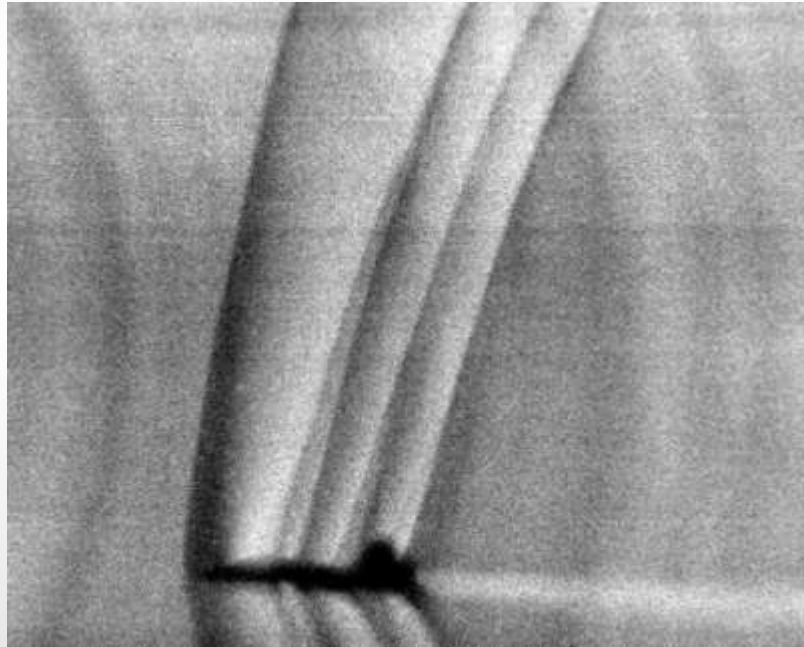
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ Exemplo **Schlieren**:



Visualização das ondas de choque em uma aeronave em vôo utilizando a técnica schlieren em um telescópio.

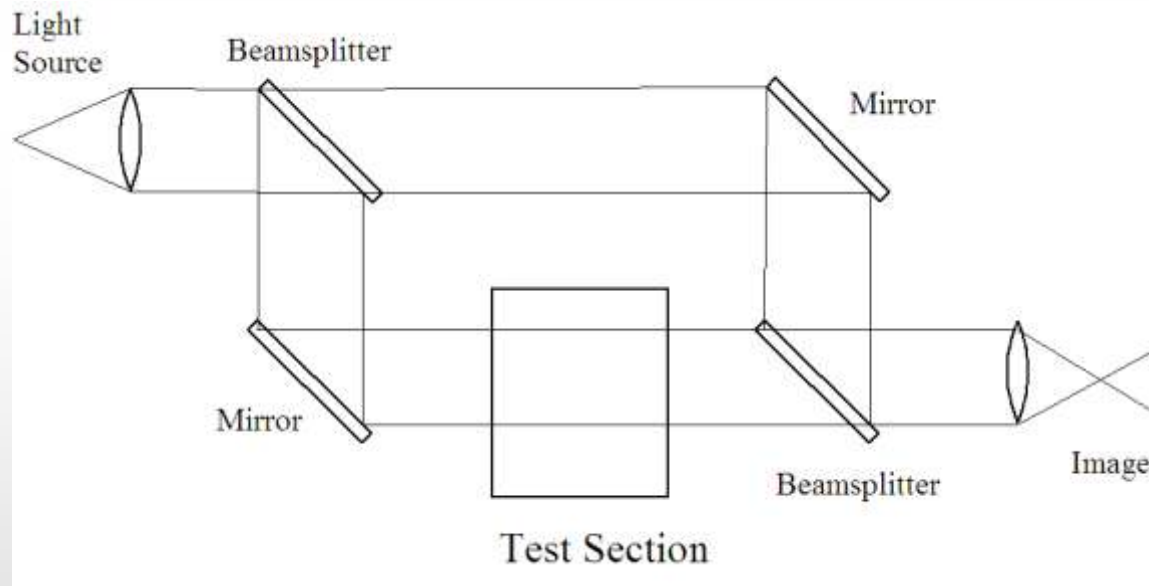
# Visualização de escoamentos

I.B De Paula

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

### Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ As variações na densidade do gás são observadas com a técnica de **Interferometria**. Nesta técnica os feixes de uma fonte coerente são separados e posteriormente somados, conforme desenho abaixo:



➤ Devido às diferenças de propagação dos feixes ocorre uma diferença de fase entre os feixes. Essa diferença depende do comprimento de onda, da distância percorrida pelos feixes e da densidade do gás.

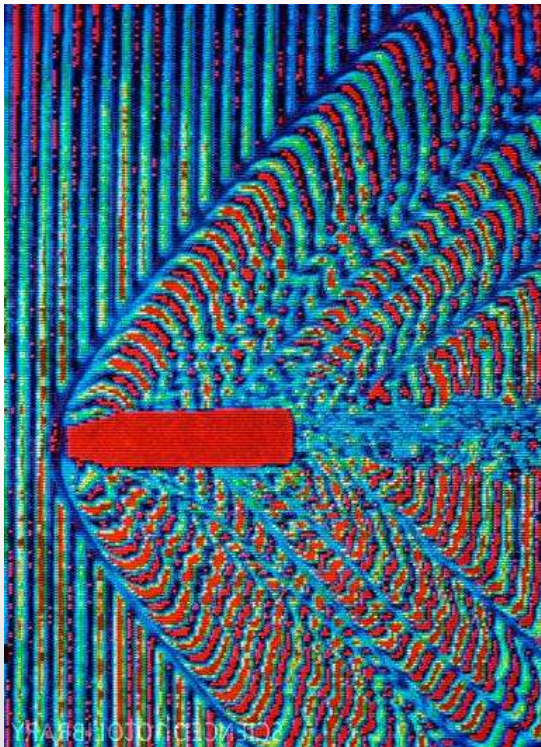
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

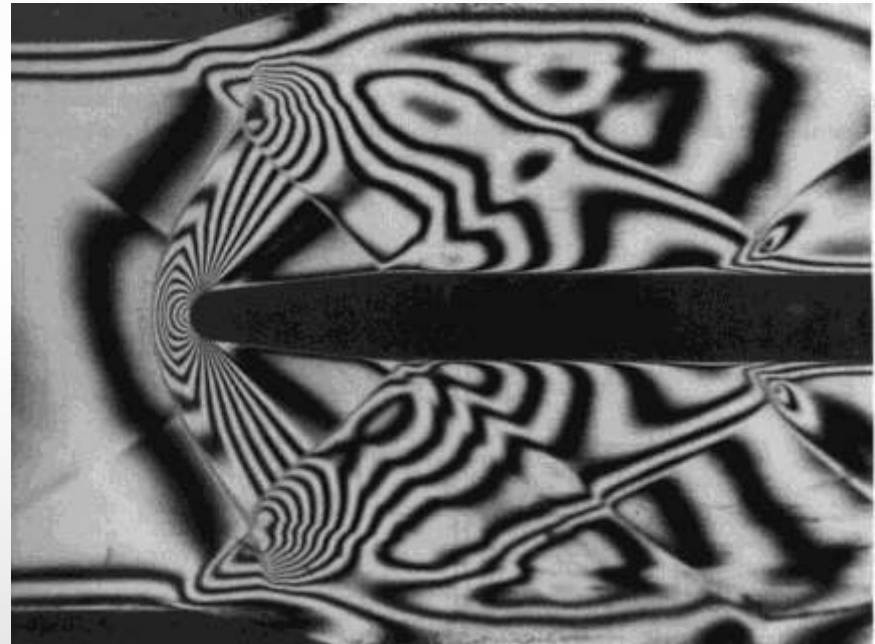
## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Shadowgraph, Schlieren e Interferômetria:

➤ Exemplos ***Interferometria:***



Visualização da onda de choque em um projétil



Visualização da onda de choque no bordo de ataque de uma placa plana

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO

- Os métodos para visualização em líquidos: são bastante empregados em escoamentos com dinâmica de vórtices e separação complexas.
- Devido à maior densidade dos líquidos, uma maior gama de materiais pode ser utilizada na visualização .
- Alguns métodos utilizados em líquidos são análogos aos utilizados em ar.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS**

Injeção de tinta: o método mais utilizado em fluidos. A técnica é análoga ao método de fumaça para gases, mas apresenta um contraste mais intenso e uma taxa de mistura menor do que no caso da fumaça.

- A escolha da tinta utilizada deve satisfazer os requisitos de ter alta estabilidade com relação à difusão, ter uma densidade próxima a do fluido e apresentar um alto contraste.
- Pode-se utilizar a injeção em locais pontuais através de agulhas ou pequenos orifícios na superfície dos modelos, No entanto deve-se ter cuidado para que a velocidade do jato de injeção não influencie o comportamento do escoamento que se deseja observar.
- Essa é uma condição crítica que muitas vezes inviabiliza o uso da técnica em casos onde a velocidade do escoamento é muito baixa, .
- Um dos maiores problemas relacionados ao uso de tintas é a contaminação do fluido.



# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

Injeção de tinta: Exemplo



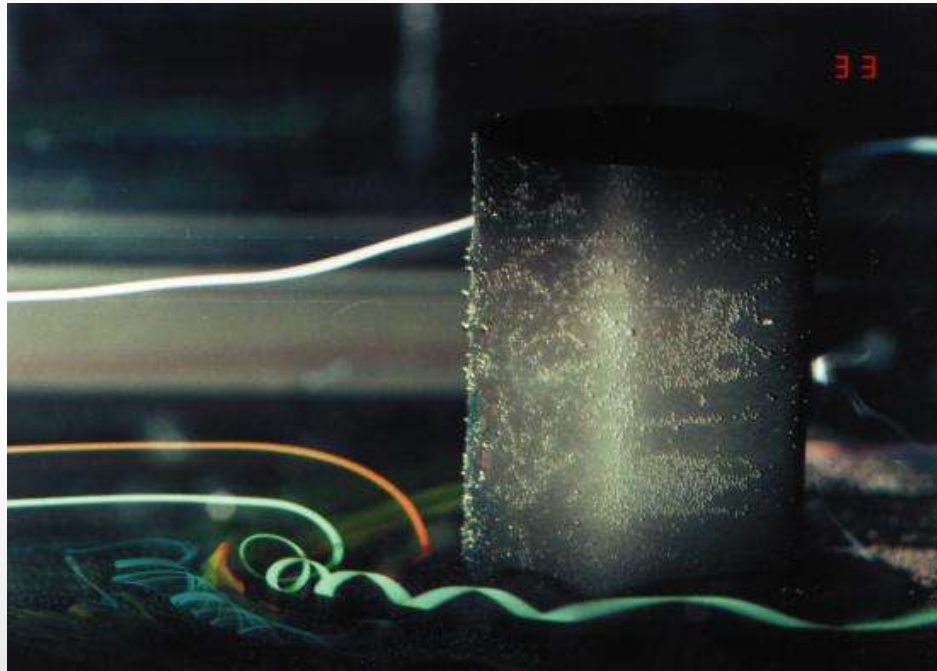
Visualização do vórtice de ponta de asa de um aerofólio

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

Injeção de tinta: Exemplo



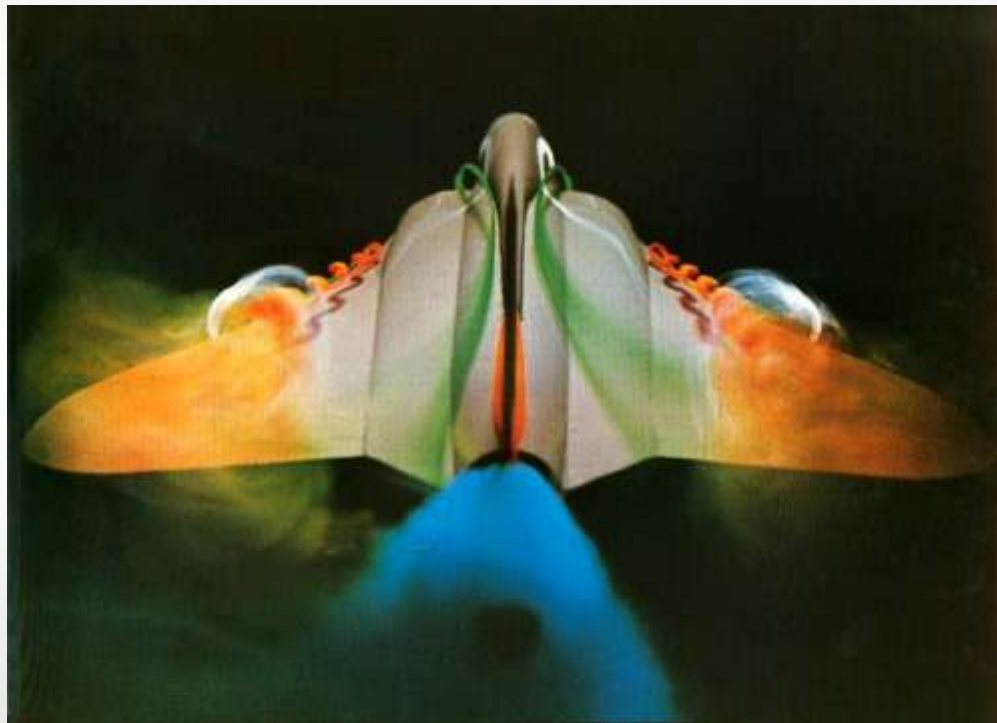
Visualização dos vórtices gerados por um cilindro sobre uma placa plana

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

Injeção de tinta: Exemplo



Visualização dos vórtices gerados em um modelo de uma aeronave testada em um túnel de água.

## METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

A geração de **bolhas de hidrogênio** como partículas traçadoras é feita através da eletrólise da água.

- As bolhas geradas nesse processo são transportadas e produzem um espalhamento razoável de luz, o que permite uma boa visualização.
- Para a geração de bolhas que seguem com fidelidade o escoamento deve-se minimizar o diâmetro da bolha de modo que as forças de empuxo sejam desprezíveis em comparação com a força de arraste da bolha. Normalmente utiliza-se fios de platina ou tungstênio com diâmetro da ordem de 25 a 50 microns para a geração das bolhas. O diâmetro da bolha gerada é em torno de metade do diâmetro do fio.

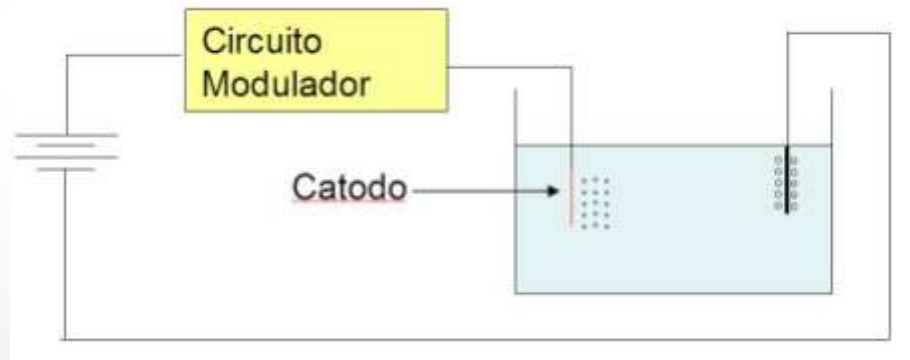
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

### Bolhas de hidrogênio

O esquema de funcionamento do gerador de bolhas pode ser observado na figura abaixo.



As bolhas de hidrogênio geradas no catodo são transportadas pelo escoamento. Sendo assim, é necessário que a sonda do gerador de bolhas seja inserida no escoamento

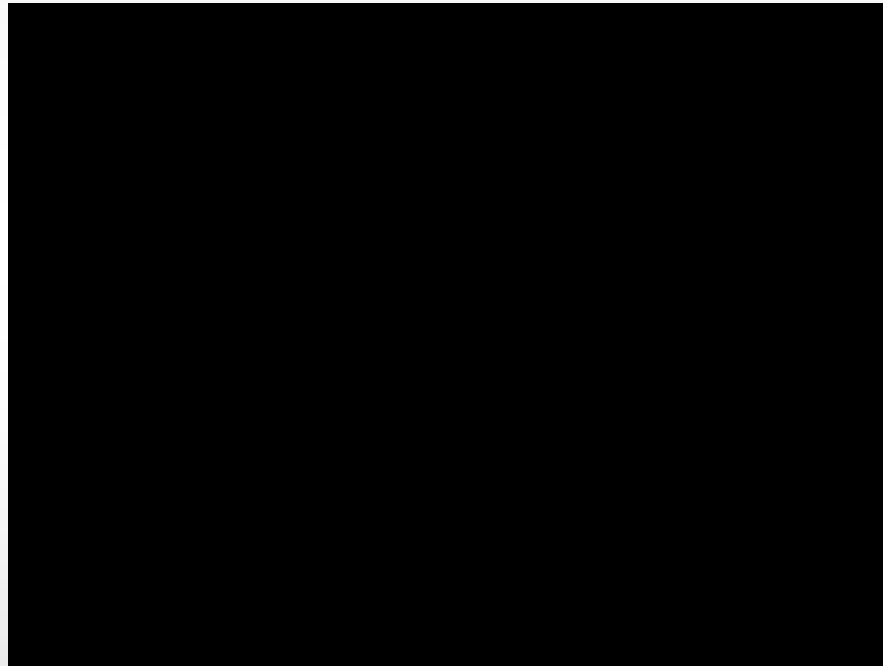
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

---

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

### Bolhas de hidrogênio



As bolhas de hidrogênio geradas no catodo são transportadas pelo escoamento. Sendo assim, é necessário que a sonda do gerador de bolhas seja inserida no escoamento

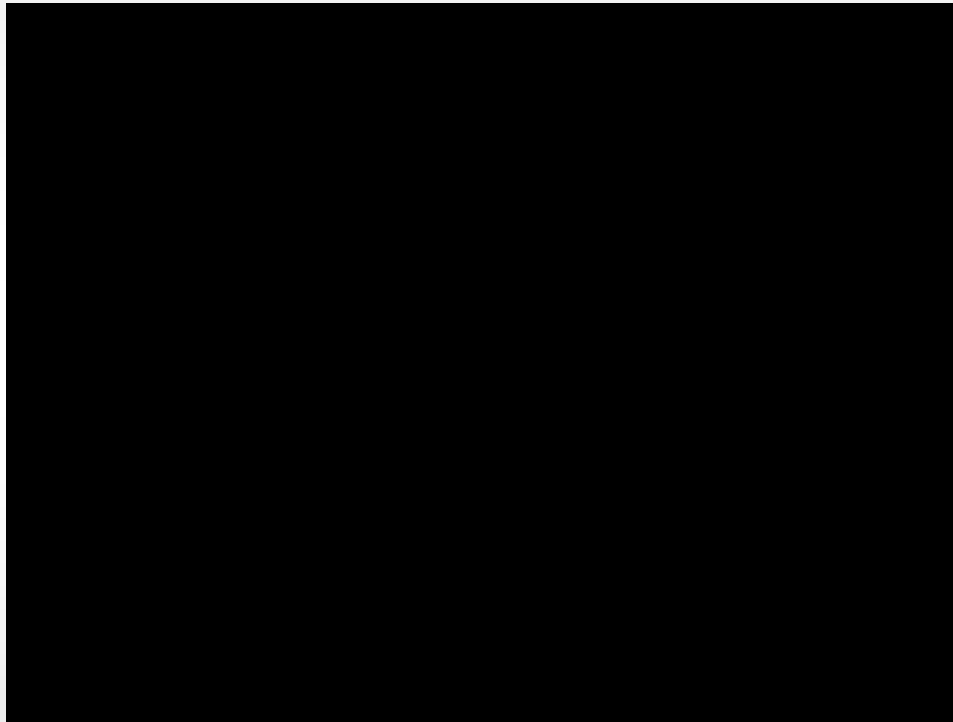
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

---

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

Bolhas de hidrogênio: Exemplo



Visualização do escoamento na contração de um canal utilizando bolhas de hidrogênio.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS**

Azul de timol: A técnica do azul de timol é uma técnica eletro-química que é utilizada para escoamentos de baixa velocidade. Sendo muito empregada para a visualização em escoamentos de convecção natural.

- Na técnica, um indicador do pH é adicionado à água, sendo levado a um ponto de pH neutro pela adição de ácidos ou bases. Uma corrente contínua é aplicada entre o anodo e o catodo. No catodo, o pH é alterado localmente produzindo uma variação de cor no indicador de pH.
- Produz-se um marcador que é neutro, do ponto de vista do empuxo.

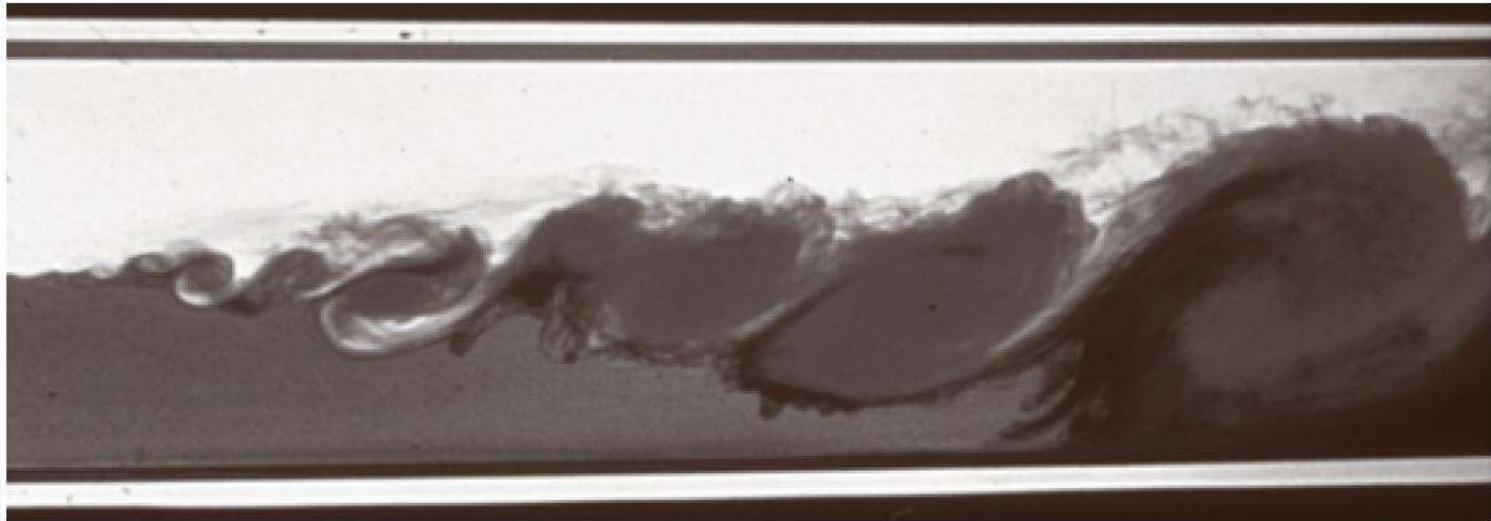


# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS

Azul de timol: Exemplo



Visualização do escoamento em uma camada cisalhante com a utilização de indicador de pH.

## **METODOS DE VISUALIZAÇÃO EM LÍQUIDOS**

Adição de partículas iluminadas externamente: Uma técnica bastante utilizada é a introdução de partículas sólidas no fluido. Nesse método as partículas são inseridas no escoamento a montante da região de testes e assim como as bolhas e demais traçadores devem possuir densidade próxima a do fluido para evitar efeitos de empuxo.

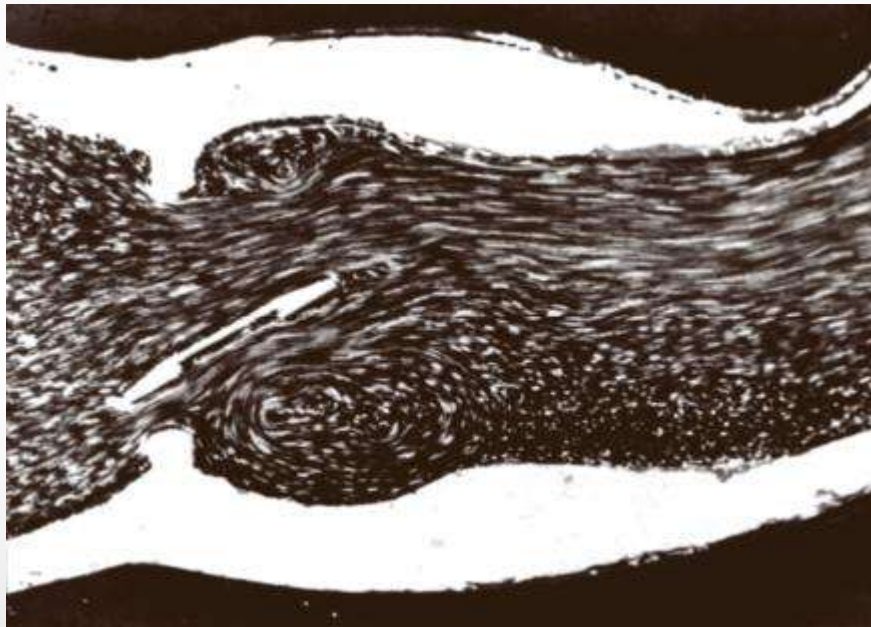
- Através de iluminação externa, estas partículas podem ser filmadas ou fotografadas. Antes limitada a estudos qualitativos, a técnica de partículas sólidas iluminadas é hoje uma das mais modernas e poderosas técnicas para determinação quantitativa de escoamentos transientes.
- As partículas devem refletir luz suficiente e capaz de acompanhar o escoamento. Fotografias com grandes tempos de exposição revelam as trajetórias do escoamento.
- A qualidade das visualizações depende da iluminação.
- Atualmente a técnica é usada para medições quantitativas (PIV)

# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Adição de partículas iluminadas externamente: Exemplo



Visualização do escoamento em uma válvula cardíaca artificial com traçadores sólidos .

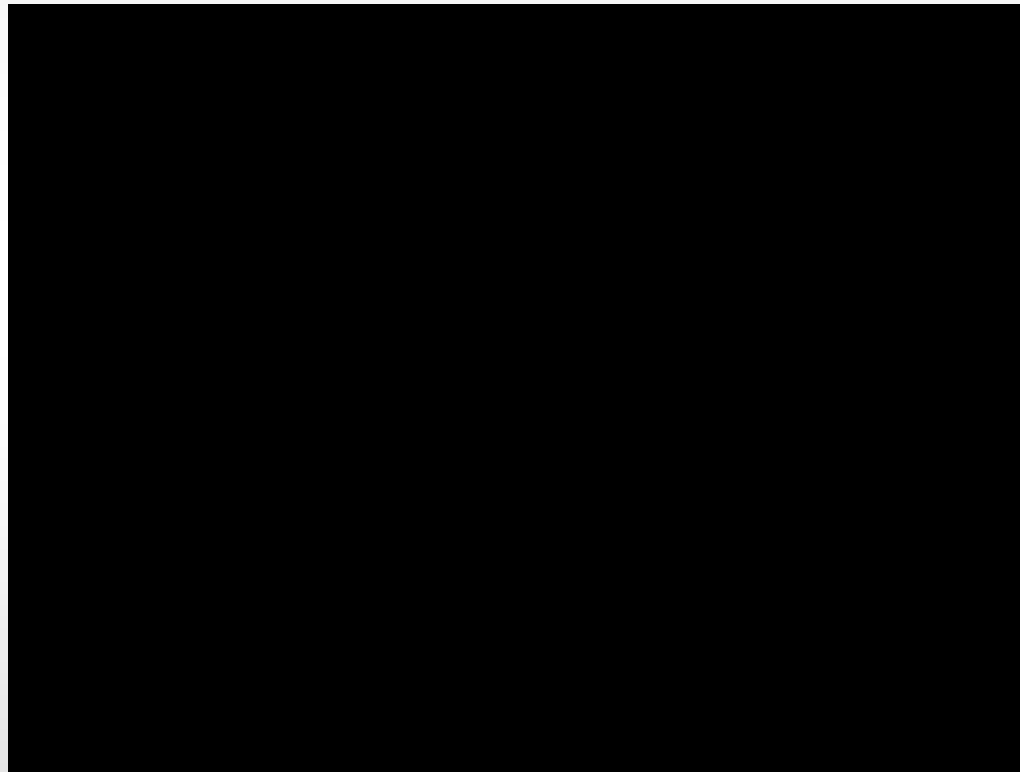
# Visualização de Escoamentos

I.B De Paula

---

## MÉTODOS DE VISUALIZAÇÃO EM GASES

Adição de partículas iluminadas externamente: Exemplo



Visualizações feitas Por L. Prandtl (1908) e processamento usando a técnica de PIV para medição de Vorticidade (Wilert and Kompenhans 2010)