

- **Visualização de Escoamentos**

Visualização de escoamentos é uma ferramenta muito importante nas investigações de mecânica dos fluidos e transferência de calor. A visualização pode ajudar a entender fenômenos básicos do escoamento (ex: estrutura da turbulência, transição laminar/turbulento, etc.). Também pode ajudar na escolha da instrumentação adequada para ser utilizada em um escoamento (por exemplo, a escolha do tipo de sensor de velocidade).

Os métodos de visualização variam de acordo com o tipo de fluido estudado:

- métodos para visualização de gases
- métodos para visualização de líquidos

Antes de apresentar as técnicas de visualização mais utilizadas, precisamos entender o que as imagens nos mostram.

Linhas de corrente, linhas de tinta e trajetórias são curvas definidas com o intuito de auxiliar a definição dos escoamentos. A seguir são apresentadas as definições destas linhas:

Trajectoria: é a curva descrita por uma determinada partícula de fluido durante um intervalo de tempo.

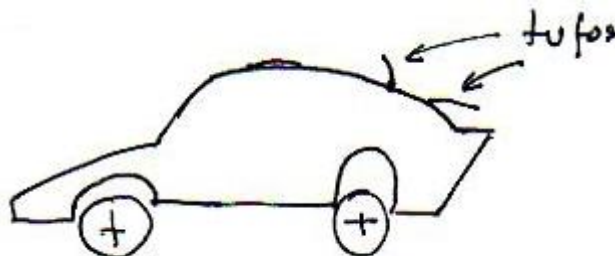
Linha de Corrente: é a curva que, para um dado instante de tempo, é tangente ao vetor velocidade em todos os pontos.

Linha de Tinta: é o lugar geométrico das partículas que passaram por um determinado ponto durante um dado intervalo de tempo.

- **Visualização em Gases:**

- Gases Incompressíveis ( $M < 0,2$ )

Técnica do tufo: um fio flexível é colocado em cada ponto do escoamento indicando a direção e o sentido do mesmo. Normalmente usa-se fios de lã ou algodão.



- Visualização junto a superfícies sólidas

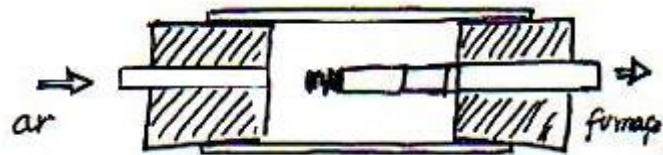
Uma técnica utilizada para visualizar o escoamento de gases junto a superfícies sólidas é chamada de óleo com negro de fumo. Nesta técnica recobre-se a superfície em estudo com uma mistura de óleo com negro de fumo. A tensão cisalhante gerada pelo escoamento desloca a mistura fazendo aparecer o padrão de escoamento. Como a mistura não se solidifica, fotografia é usada para a obtenção de um registro permanente. Para aumentar o contraste, a superfície sólida pode ser coberta com tinta branca ou papel "contact". A viscosidade da mistura deve ser ajustada para cada escoamento.

- Injeção de fumaça

Injeção de fumaça é, talvez, o método mais utilizado de visualização em gases. No caso de escoamentos turbulentos esta técnica não se aplica, devido à mistura associada ao escoamento turbulento.

Na geração de fumaça utiliza-se:

- fumaça de cigarro



- vaporização de óleos: óleo de rícino  
óleo de parafina  
óleo lubrificante (SAE 20 ou 30)  
querosene

Na vaporização pinga-se óleo sobre um fio quente aquecido eletricamente.

- produtos químicos (tóxicos): tetracloreto de titânio  
tetracloreto de estanho

Estes produtos produzem fumaça brilhante.

No uso da fumaça devemos considerar 3 fatores:

- toxidez da fumaça
- deposição de resíduos no modelo ou túnel
- no caso dos óleos, perigo de incêndio

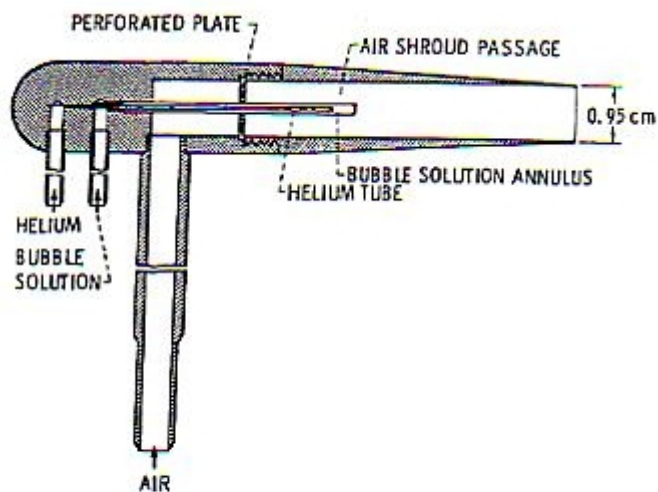
- **Visualização com Partículas Sólidas**

Geradores de aerossóis podem ser usados para alimentar o escoamento com pequenas partículas sólidas. Dois problemas devem ser considerados:

- poluição ambiental;
- a fidelidade com a qual as partículas seguem o escoamento.

- **Visualização com Bolhas de Sabão com Hélio**

A limitação da utilização da técnica de injeção de fumaça deve-se à mistura produzida pelo escoamento. Partículas sólidas, por outro lado, normalmente possuem densidade muito superior à do ar, o que dificulta o acompanhamento do escoamento. 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. É uma técnica muito boa para baixas e altas velocidades.



*Fig. 2.19* Head of helium-bubble generator. (From Colladay and Russell, 1976. Reproduced with permission from The American Society of Mechanical Engineers.)

Para gases compressíveis pode-se utilizar técnicas de visualização baseadas na variação do índice de refração da luz provocada pela variação da densidade. Estas técnicas são: shadowgraph, Schlieren e interferometria.

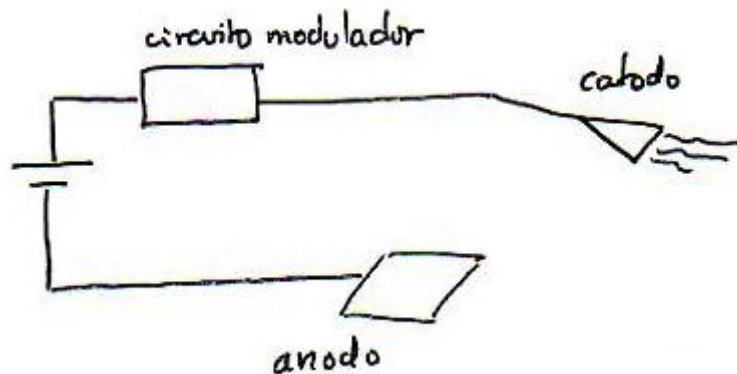
- **Visualização em Líquidos**

Devido à maior densidade dos líquidos, uma maior gama de materiais pode ser utilizada na visualização:

- Injeção de tintas: tintas de várias cores são injetadas através de agulhas em pontos estratégicos do fluido. Para escoamentos muito lentos ou movidos por diferença de densidade, deve-se tomar cuidado com a densidade do fluido injetado relativamente à densidade do fluido. Também a velocidade de injeção não deve ser muito distinta da velocidade local do ponto de injeção. Escoamentos turbulentos provocam mistura que inviabiliza a utilização da técnica.

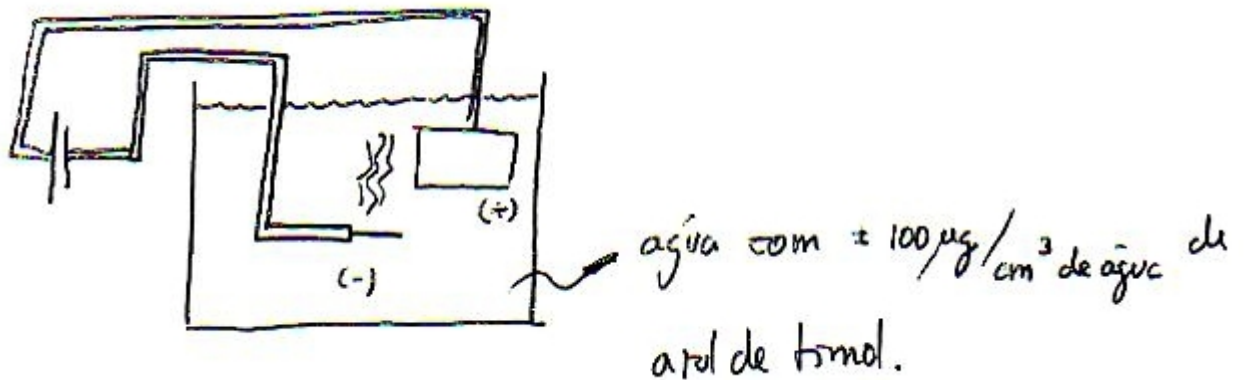
- Bolhas de hidrogênio: consiste na geração de pequenas bolhas de hidrogênio a partir da eletrólise da água. As bolhas são carregadas pelo escoamento que pode então ser visualizado.

A referência original é: Schraub, Kline, Herry, Runstadler and Littel, "Use of hydrogen bubbles for quantitative determination of time-dependent velocity fields in low-speed flows", ASME Journal of Basic Engineering, volume 87, pp. 429-444, 1965.



O fio utilizado é de platina ou tungstênio. O tamanho da bolha produzida é da ordem de diâmetro do fio / 2. Usa-se fio de 25 a 50  $\mu\text{m}$  para minimizar efeitos de empuxo.

- Técnica do azul de timol: a técnica do azul de timol é uma técnica eletro-química utilizada para escoamentos de baixa velocidade. É muito utilizada 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. Assim produz-se um marcador que é neutro, do ponto de vista do empuxo.



A baixa taxa de produção do corante limita a técnica a aplicações de baixa velocidade.

- Partículas sólidas iluminadas externamente: uma técnica bastante utilizada é a introdução de partículas sólidas no fluido. 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.

Iluminação: a iluminação é um fator determinante para a qualidade das visualizações produzidas. As iluminações podem ser planas ou volumétricas, constantes ou pulsadas.

Algumas referências importantes na área de visualização:

- 1) Flow visualization, Wolfgang Merckirch, Academic Press, 1987.
- 2) Flow visualization by direct injection, Thomas J. Mueller, em Fluid Mechanics Measurements, ed. R.J. Goldstein, 1983, Hemisphere Publishing Corporation. (existe uma edição mais nova, de 1994).
- 3) An Album of Fluids Motion, Milton Van Dyke, Parabolic Press, 1982.

### • Medida de Velocidade

A escolha do instrumento ideal para a medida da velocidade deve levar em consideração os seguintes fatores:

1. boa resposta de frequência para a medida de transientes
2. pequenas dimensões do sensor para permitir boa resolução espacial
3. larga faixa de velocidade

4. ser sensível somente à velocidade numa larga faixa de temperatura
5. medir as componentes do vetor velocidade e reversão de escoamento
6. provocar pequenas perturbações no escoamento
7. custo baixo
8. fácil de utilizar
9. alta exatidão

Os três principais instrumentos utilizados para a medição pontual da velocidade são: o tubo de Pitot/estático, o anemômetro de fio quente e o anemômetro Laser-Doppler.

O tubo de Pitot/estático já foi comentado anteriormente. É um instrumento bastante simples, de fácil utilização e baixo custo. Sua resposta de frequência é razoavelmente boa quando a diferença de pressão é medida com sensores elétricos. O tubo de Pitot possui uma faixa limitada de velocidade, pois baixas velocidades produzem pequenas diferenças de pressão, difíceis de serem medidas. O tubo de Pitot não é capaz de medir reversão de escoamentos e perturba o escoamento.

- **Anemômetro de Fio / Filme Quente**

Referências: 1) Thermal Anemometers, Fingerson and Freymuth em Fluid Mechanics Measurements, ed. Goldstein.

2) An Introduction to Turbulence and its Measurements, P. Bradshaw, Pergamon Press.

Anemômetros de fio/filme quente são instrumentos que medem a velocidade do fluido a partir de mudanças na transferência de calor de um pequeno sensor aquecido eletricamente e exposto ao escoamento.

A taxa de transferência de calor de um fio é dada por:

$$q = (a + b\sqrt{u}) \cdot (T_w - T_\infty)$$

$T_w$ : temperatura do fio

$T_{00}$ : temperatura do fluido

$u$ : velocidade do escoamento

$a, b$ : constantes de calibração

A taxa de transferência de calor é também dada por:

$$q = i^2 R_w = iR[1 + \alpha(T_w - T_0)]$$

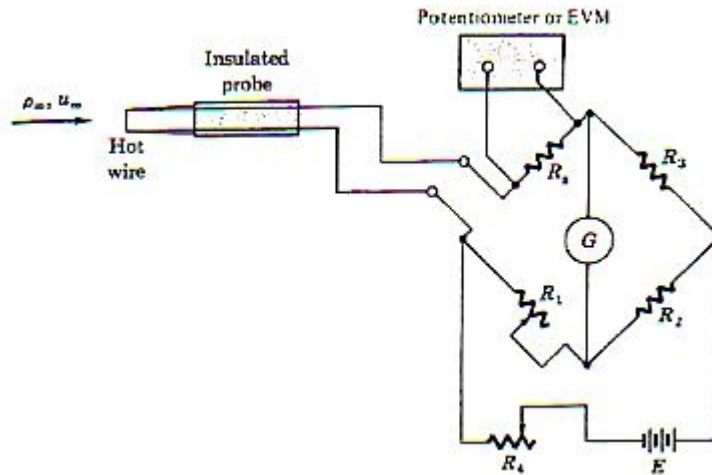
$i$ : corrente no fio

$R_0$ : resistência do fio na temperatura de referência  $T_0$

$\alpha$ : coeficiente de resistência

Na condição de equilíbrio:

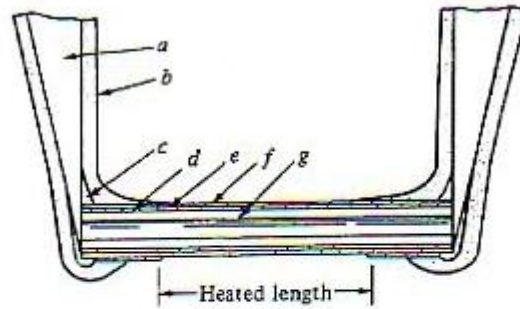
$i^2 R_w = (a + b\sqrt{u}) \cdot (T_w - T_\infty)$ , desprezando-se as perdas por condução e radiação.



O sensor de fio/filme quente é conectado a uma ponte. A corrente que passa pelo fio quente é medida pelo voltímetro na resistência  $R_s$ , enquanto a resistência do fio é medida pela ponte. Com  $i$  e  $R_w$  conhecidos, as equações anteriores podem ser resolvidas para  $u$ . Dois tipos de modos de operação são utilizados:

- temperatura constante (melhor resposta freqüência)
- corrente constante

Os fios utilizados são de platina (1 a 10  $\mu\text{m}$ ) ou tungstênio (5 a 10  $\mu\text{m}$ ). Os fios são normalmente frágeis e se rompem quando atingidos por partículas presentes no escoamento. Também no caso do escoamento de líquidos, as tensões cisalhantes sobre os fios podem rompê-los. Nestes casos, o fio sensor é substituído por um filme fino depositado em um substrato de cerâmica.



- a. Metallic leg of sensor holder, which acts as an electrical terminal
- b. Epoxy coating
- c. Gold bonding for electrical and mechanical connections
- d. Electroplated gold layer, about  $5 \mu\text{m}$  thick
- g. Glass tube, about 25 to  $100 \mu\text{m}$  diameter

Por sua excelente resposta de frequência, anemômetros de fio/filme quente são muito utilizados nas medições de flutuações turbulentas de escoamentos. As pequenas dimensões dos fios sensores (tipicamente  $2\text{mm} \times 5\mu\text{m}$ ) produzem boa resolução espacial. A faixa de velocidade é bastante ampla e possui boa exatidão. Arranjos especiais permitem a medição de três componentes da velocidade. A exatidão é bastante boa mas o instrumento requer calibração constante. A contaminação do fio altera a calibração. A presença das sondas perturba o escoamento. O custo destes instrumentos é intermediário.

Algumas correções são normalmente consideradas:

- efeitos de convecção natural (desprezíveis para  $Re > 0.5$  e  $Ra < 10^4$ )
- efeitos de radiação (desprezíveis se a temperatura do fio for menor que  $300^\circ\text{C}$ )
- condução pelos suportes: recomendável:  $l/d > 200$



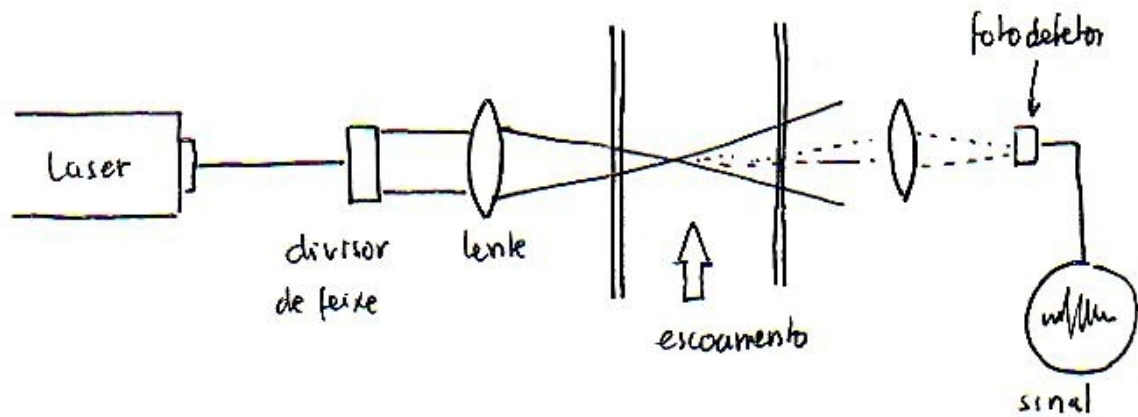
- **Anemômetro Laser-Doppler**

Anemômetro Laser-Doppler mede a velocidade do fluido a partir da detecção da variação da frequência da luz espalhada por pequenas partículas ( $0,1 - 10\mu\text{m}$ ) que

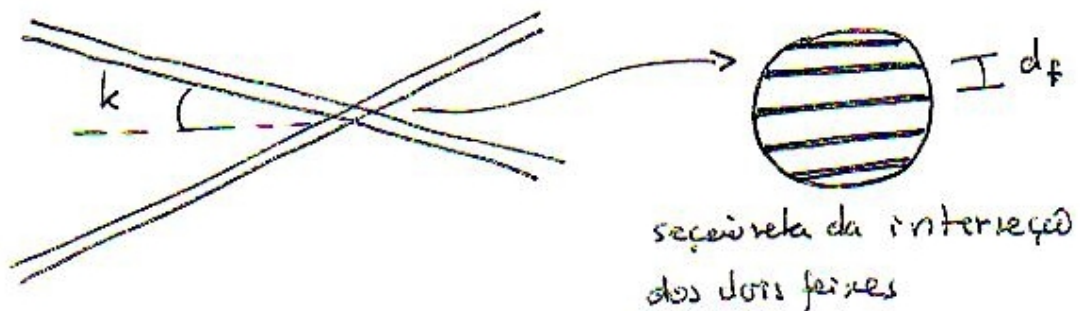


se movem com o fluido. É uma técnica relativamente recente (o trabalho pioneiro é de 1964) mas existem equipamentos comerciais de alta confiabilidade.

Ref: Laser Velocimetry, R. Adrian em Fluid Mechanics Measurements, Goldstein.



O modelo da franja, apesar de não totalmente correto, ajuda a entender o funcionamento.



Pode-se provar que o espaçamento das franjas é:

$$d_f = \frac{\lambda}{2 \sin k}$$

onde:

$\lambda$ : comprimento de onda da luz (bem conhecido)

$k$ : ângulo dos feixes (bem conhecido da geometria das lentes)

Uma partícula cruzando o volume de medida vai emitir luz com uma frequência:

$$v_D = \frac{u}{df} = \frac{2u \operatorname{sen} k}{\lambda}$$

Mede-se  $v_D$  e calcula-se  $u$ . Note que somente  $u_x$  interessa.

Arranjos especiais com mais de um par de feixes e cores diferentes permitem a medição de 3 componentes de velocidade. Variações na frequência de apenas um dos feixes permite a medição da reversão do escoamento.

LDV's apresentam excelente resposta de frequência e não requerem calibração. A faixa de velocidade é extremamente ampla (10  $\mu\text{m/s}$  a 1 km/s). Os volumes de medição permitem excelente resolução espacial (50 $\mu\text{m}$  x 0,25  $\mu\text{m}$ ). O LDV não perturba o escoamento, podendo ser utilizado em motores, turbinas, compressores, etc. Os fluidos e parte das paredes devem ser transparentes. Os custos são muito elevados.