

**Seminário**  
**Disciplina: Introdução à Mecânica dos Fluidos**

# Dinâmica dos Fluidos



Metodologias Experimentais

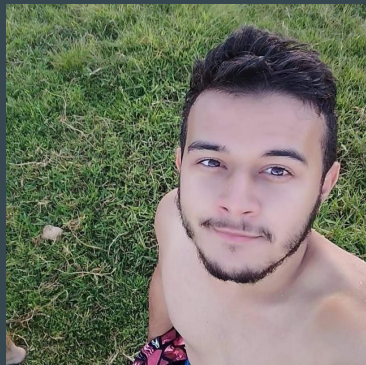
**UFES - Campus Vitória**  
**2020/1 EARTE**

# Integrantes do grupo



Aryelle Siqueira

Engenharia de Computação



Dionatas Santos

Engenharia de Computação



Pedro Fontes

Engenharia de Computação



Stefânio Jr.

Engenharia de Computação

# Professor



Bruno Furieri

DEA UFES

# Tópicos a serem abordados

- Introdução à visualização experimental de escoamentos;
- Túnel de vento: aplicações e tipos;
- Técnicas experimentais de visualização e quantificação de escoamentos aplicadas à túneis de vento: medidores de campo de velocidade - Particle Image Velocimetry (PIV) e Laser Doppler Anemometry (LDA);
- Medidores de pressão;
- Medidores de concentração;
- Exercício resolvido.

# Introdução à visualização experimental de escoamentos

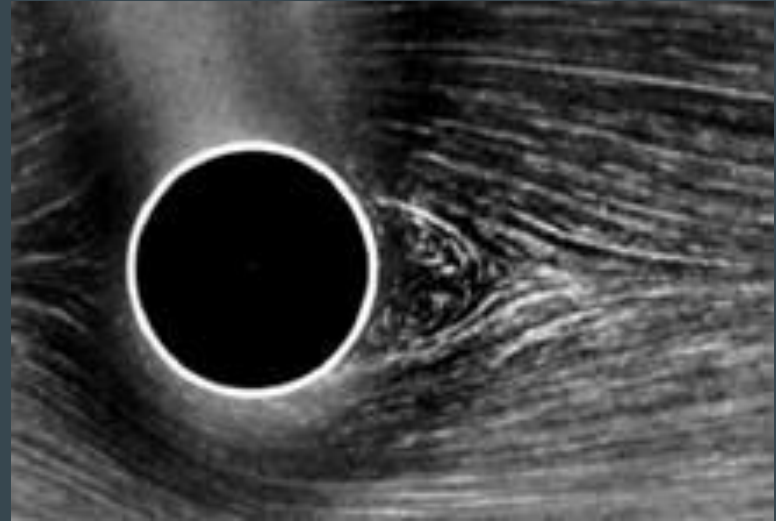
- A visualização de um processo envolvendo fluidos nos ajuda a ter uma ideia das estruturas presentes no escoamento e em seu desenvolvimento.
- O conhecimento prévio dessa estrutura básica do escoamento é bastante importante como referência para o desenvolvimento de teorias, medições e simulações
- Essas técnicas são empregadas desde o início dos estudos de mecânica dos fluidos, passando por Leonardo da Vinci, Osborne Reynolds, Ludwig Prandtl e continuam sendo importantes até os dias de hoje.

# Visualização de escoamentos - conceitos importantes

- Coordenadas Lagrangeanas  $r_p = r(x_p, y_p, z_p)$

- Velocidade  $\vec{u}_p(r_p, t) = dr_p/dt$

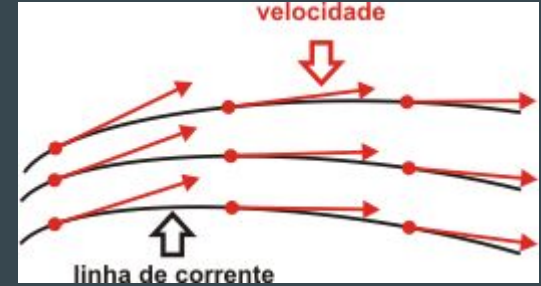
- Trajetória  $r_p = \int_{t_0}^t \vec{u}_p dt + r_0$



# Visualização de escoamentos - Conceitos importantes

- Linhas de corrente

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

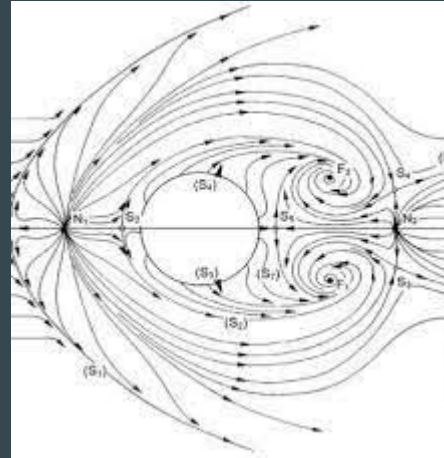
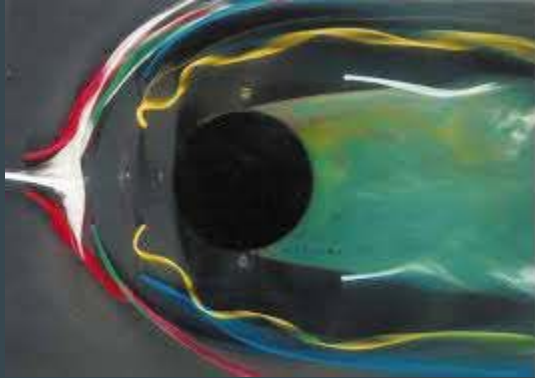


- Linhas de tinta

$$\mathbf{r}_\tau = \int_{\tau < t}^t \vec{u}_p(\mathbf{r}, \tau, t) dt + \mathbf{r}_0$$

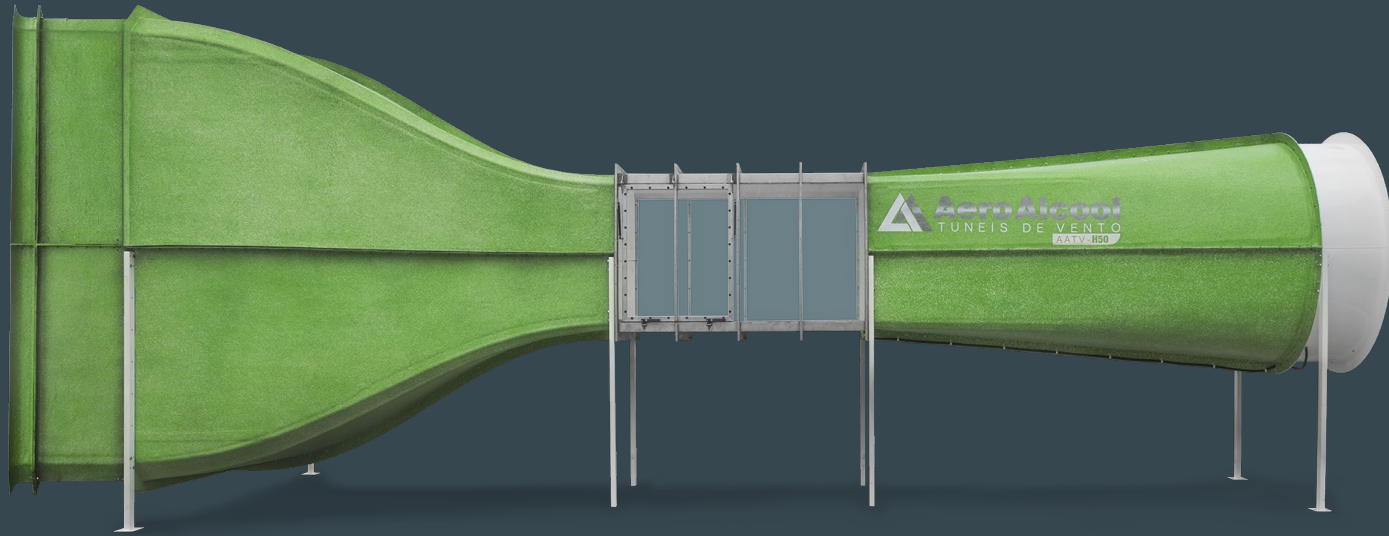
# Visualização de escoamentos - Topologia de escoamento

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

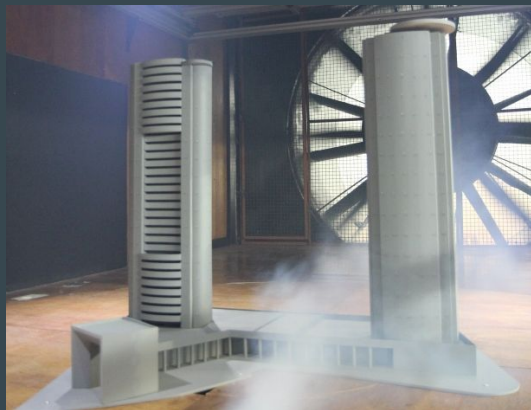




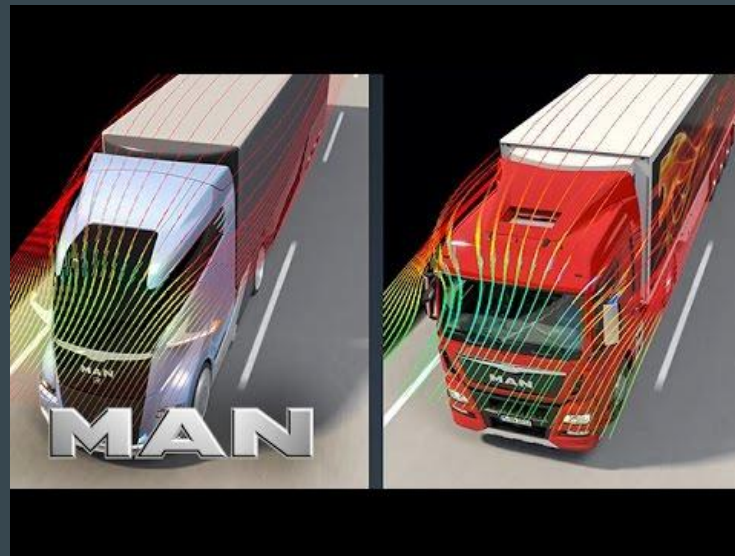
# Túnel de vento: aplicações e tipos - como funciona?



# Túnel de viento: tipos



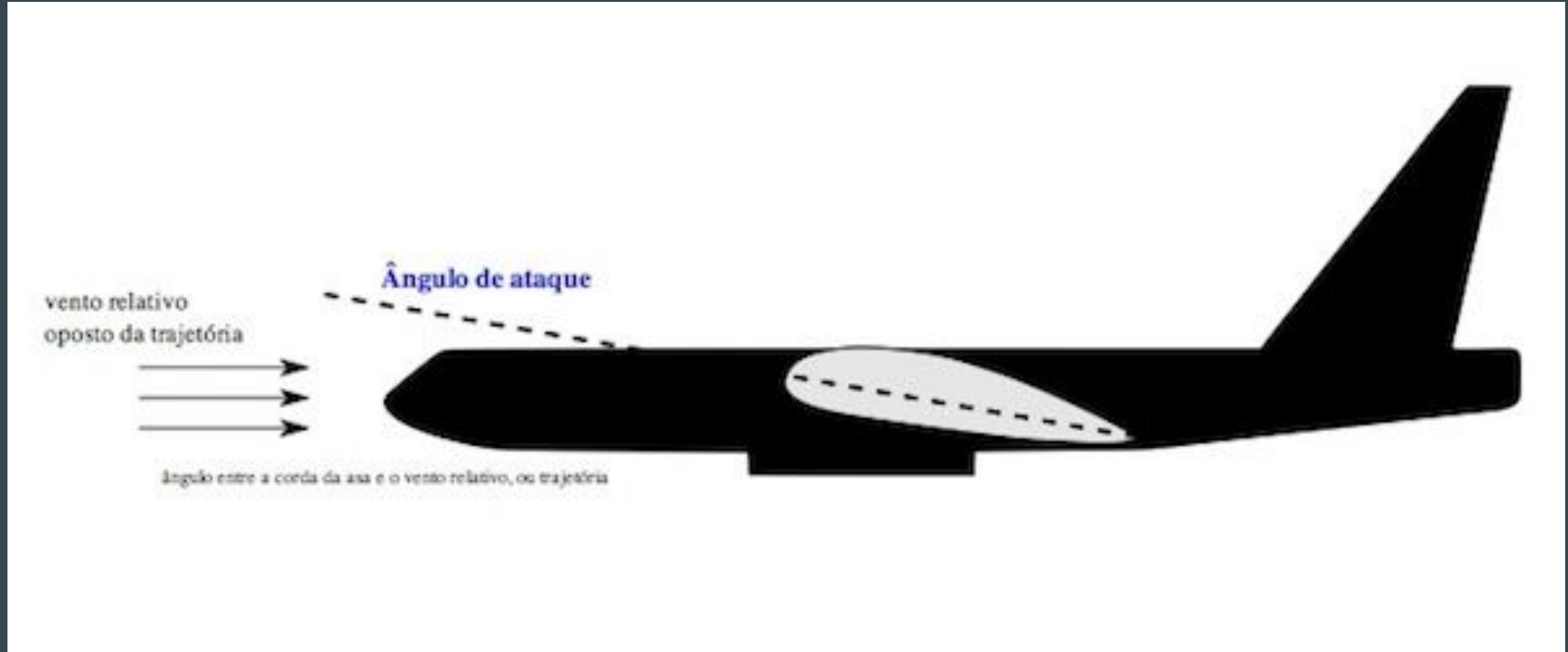
# Túnel de vento: aplicações



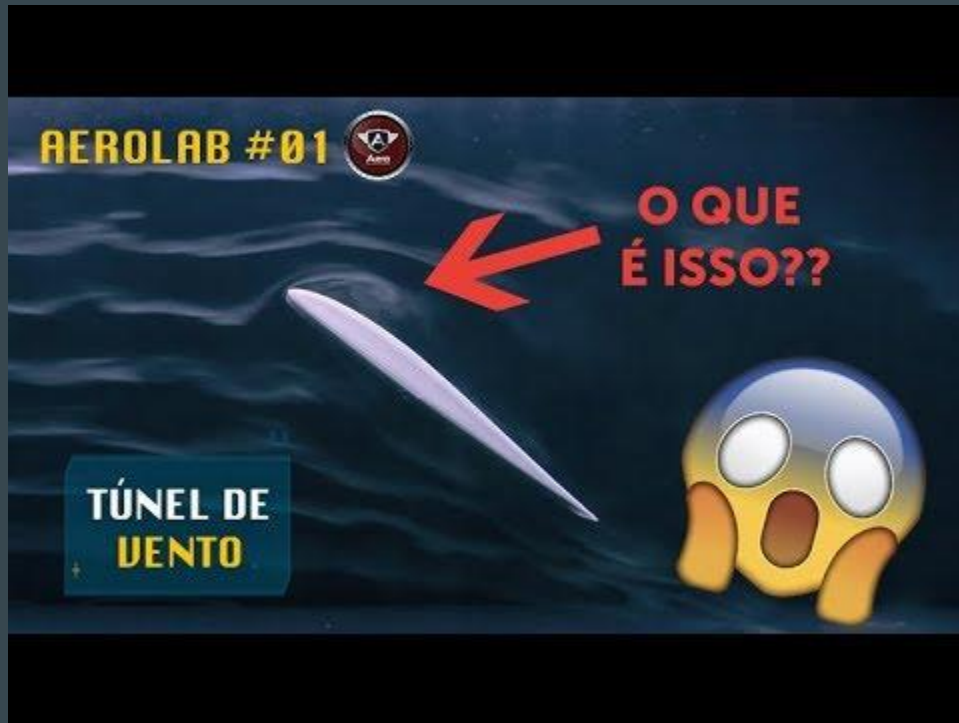
# Túnel de vento: aplicações



# Túnel de vento: aplicações



# Túnel de vento: aplicações



# Técnicas experimentais de visualização e quantificação de escoamentos aplicadas a túneis de vento: PIV e LDA

- Medições de campo: **velocimetria por imagem de partícula (PIV)** e rastreamento de partículas (PTV).
- Medições localizadas (pontuais): tubo de pitot, anemometria térmica e **anemometria por efeito doppler (LDA)**;



## Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - pra que serve?

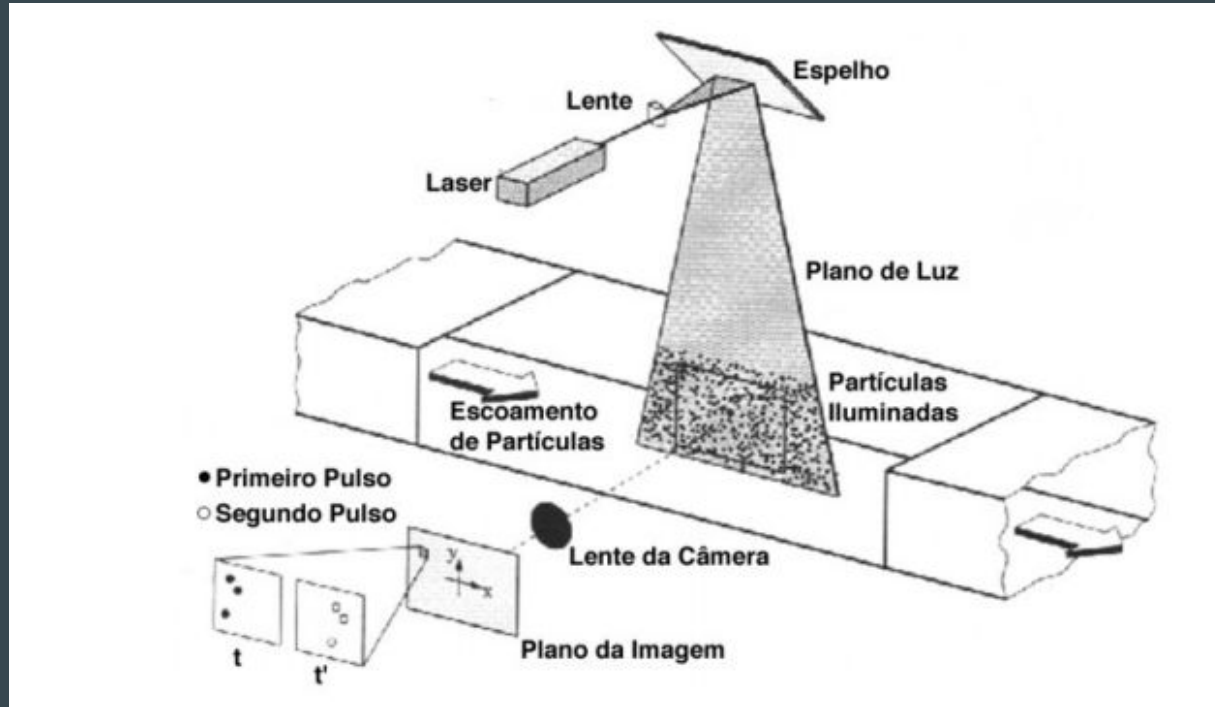
- Campos instantâneos de velocidade;
  - Campos instantâneos de vorticidade;
  - Taxas de deformação;
  - Circulação e fluxo mássico.
- Validar os códigos de CFD.



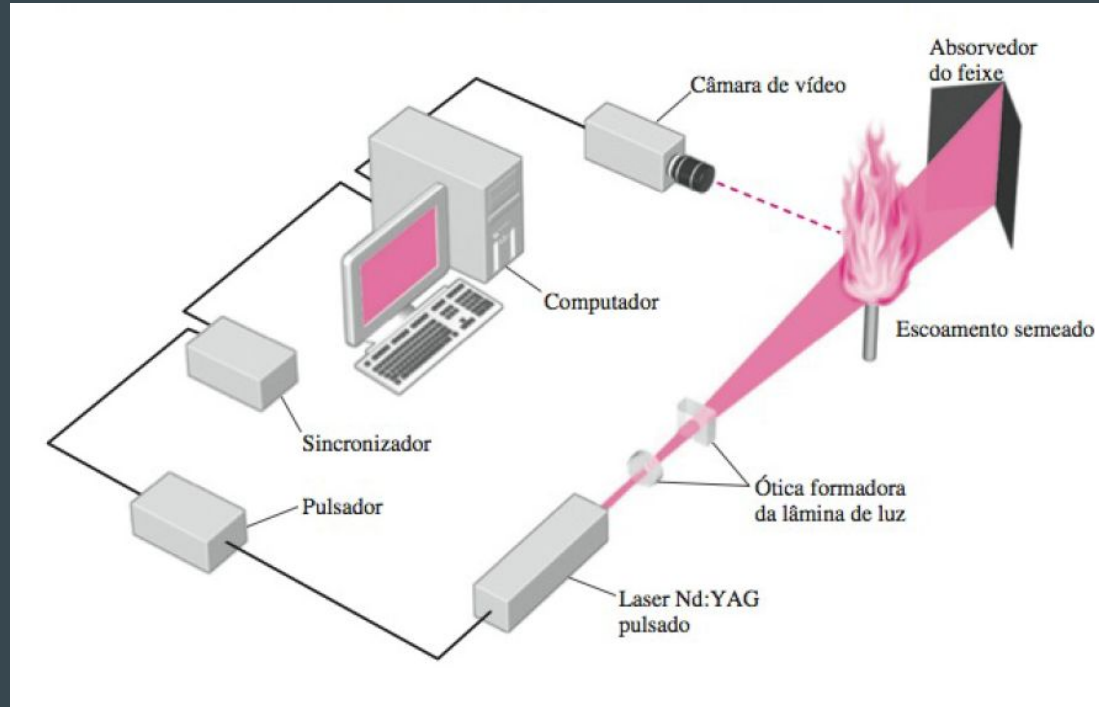
# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - aspectos gerais

- Processo de correlação com imagens capturadas;
- Método não intrusivo;
- Necessidade de partículas (naturais ou artificiais) bem definidas;
- Algoritmo de processamento de imagens exige alto desempenho computacional.

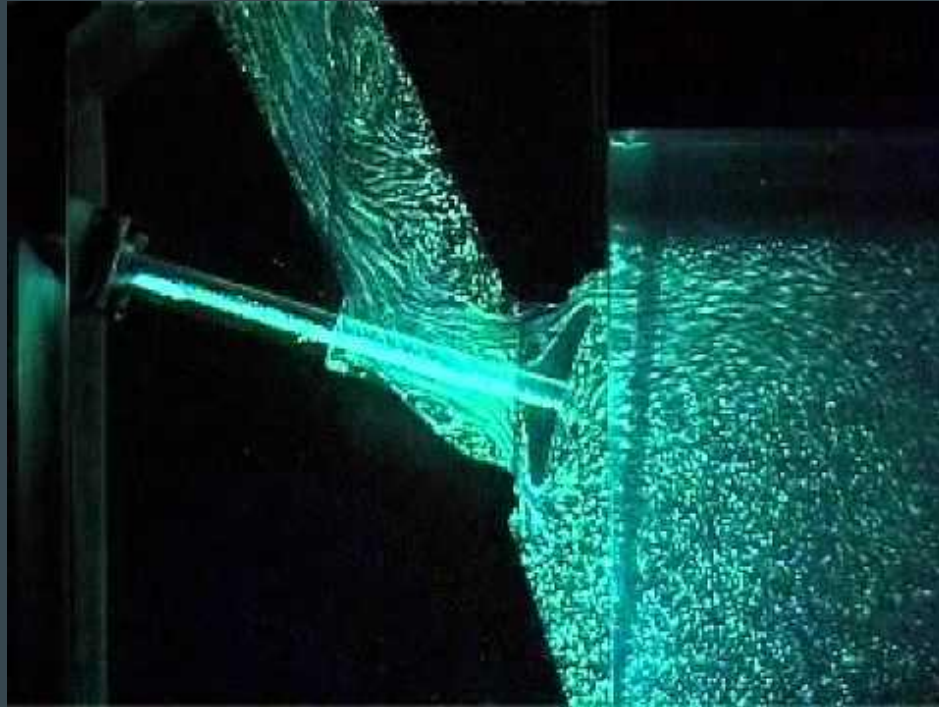
# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - como funciona?



# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - como funciona?



# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - visualização: traçador



# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - visualização: larváceos



# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - visualização: larváceos



## Anemometria por efeito doppler (LDA): pra que serve?

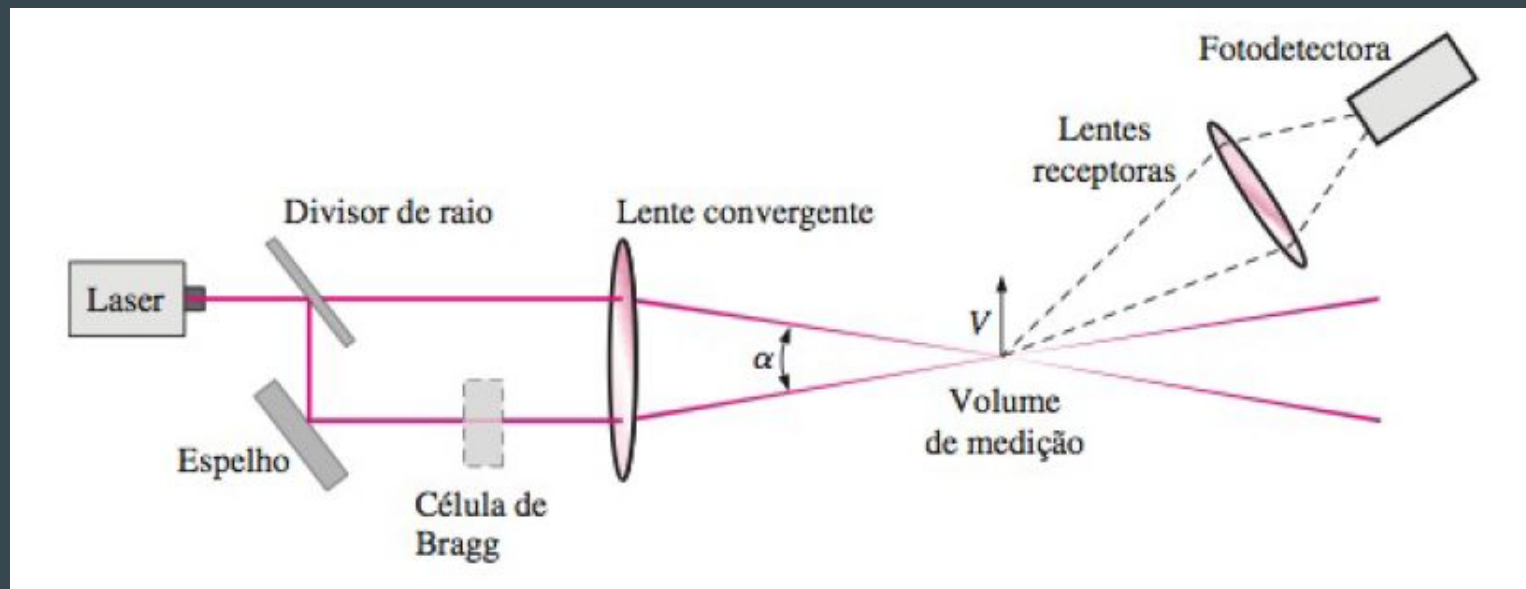
- Mede com **exatidão** a velocidade de um fluido em um volume pontual;
- Estudar com exatidão o escoamento de um fluido em uma determinada região.

## Anemometria por efeito doppler (LDA): aspectos gerais

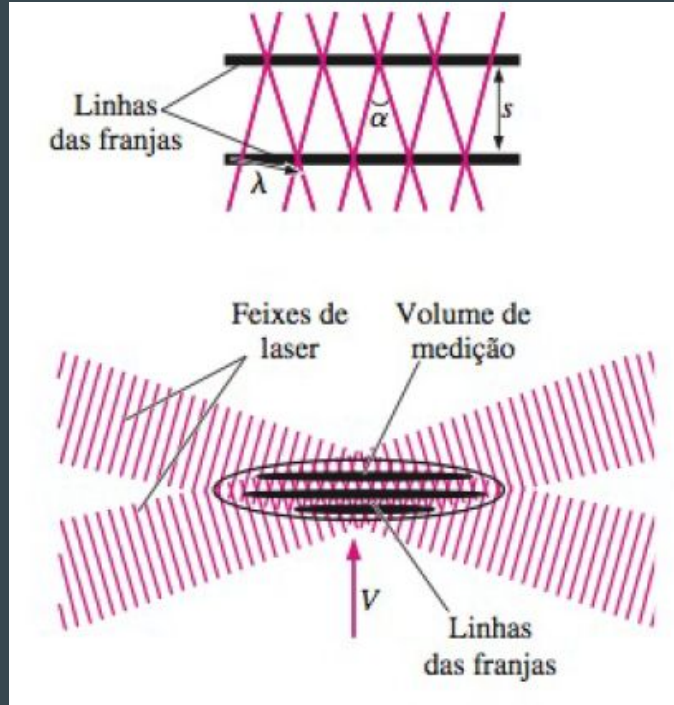
- Diferentemente da PIV, lida com regiões localizadas e não com um campo de velocidade;
- Método não intrusivo;
- Necessidade de partículas (naturais ou artificiais) bem definidas;
- Efeito doppler.



# Anemometria por efeito doppler (LDA): como funciona?



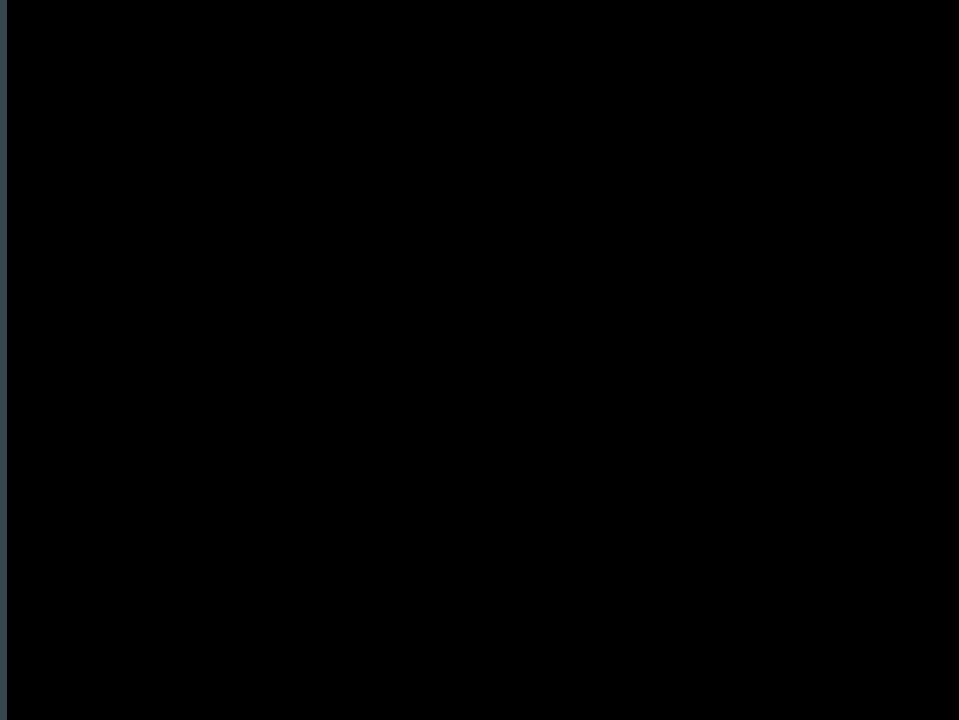
# Anemometria por efeito doppler (LDA): como funciona?



# Anemometria por efeito doppler (LDA): como funciona?

$$f = \frac{V}{s} = \frac{2V \sin(\alpha/2)}{\lambda}$$

# Anemometria por efeito doppler (LDA): visualização prática



# Medidores de pressão

- Um dos estopins que levaram os cientistas a estudarem o fenômeno da pressão foi um sistema de bomba d'água, criado por Galileu Galilei, usado na irrigação;
- A invenção tinha por base um sistema de sucção que Galileu descobriu ter a capacidade de elevar a água a uma altura máxima de 10 metros.
- A causa do limite de altura, que era desconhecida até então, chamou a atenção de pesquisadores contemporâneos.

# Barômetro

- Alguns anos mais tarde, o físico Torricelli desenvolveu o barômetro.
- Ele fez uma experiência utilizando um tubo de 1 metro preenchido com mercúrio (Hg), selado em uma das extremidades, e mergulhou-o em um reservatório também contendo mercúrio.
- A coluna de mercúrio invariavelmente escoa do tubo até ficar a uma certa altura  $h$  acima do nível do reservatório, como ilustra a imagem na próxima página.

# Barômetro

- A altura  $h$  do mercúrio no tubo varia de acordo com a altura em que se realiza a medição (relativa ao nível do mar);
- No nível do mar essa altura corresponde à exatamente 760 mm.



Barômetro de mercúrio de Torricelli

# Barômetro

- $P_A = P_B$  (princípio de Stevin)  
 $P_A = P_{\text{atm}}$   
 $P_B = P_0 + \rho_{\text{Hg}} gh$

$$P_0 = P_{\text{vapor}} \approx 0$$

$$\rho_{\text{Hg}} = 13600 \text{ kg/m}^3$$

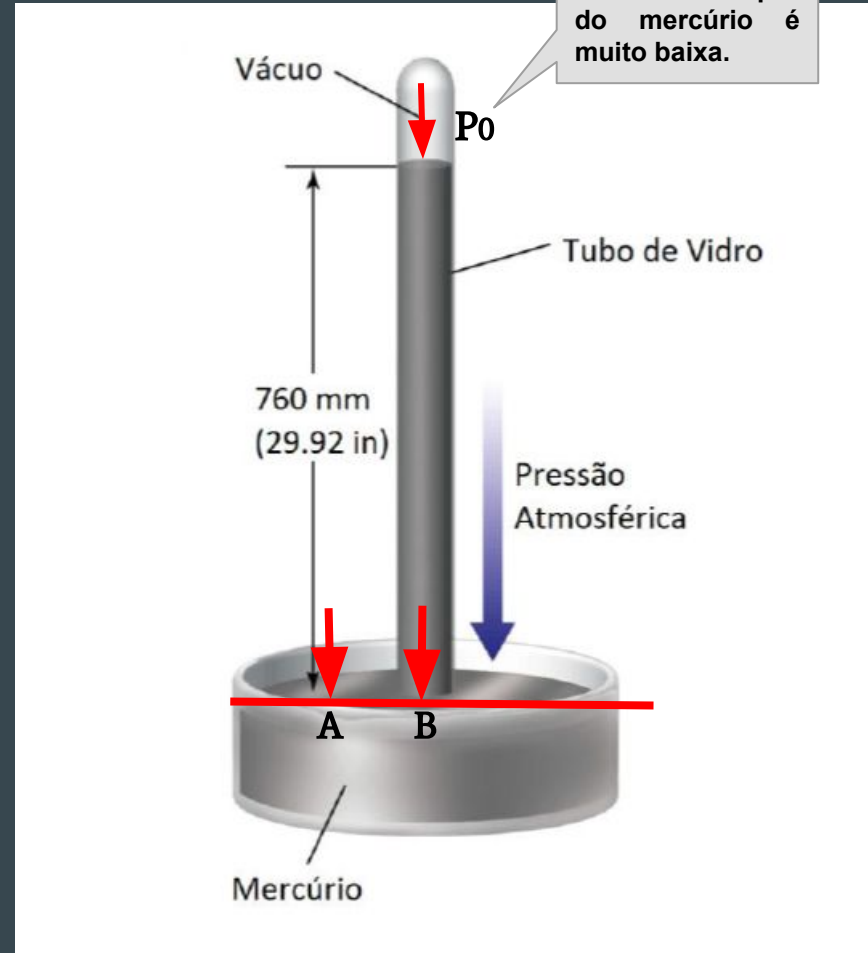
$$g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$$

$$h = 0,760 \text{ m (nível do mar)}$$

-Daí vem a pressão atmosférica:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg}$$

(A pressão atmosférica, ao nível do mar, equivale à pressão efetiva de uma coluna de 760 mm de mercúrio)





# Barômetro

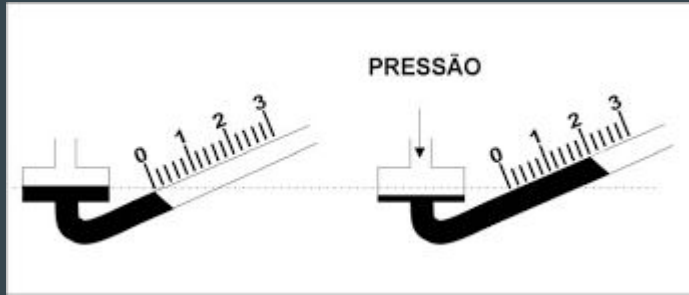
- Existe também outro tipo básico de barômetro, menos preciso, porém de menor porte, chamado de barômetro aneróide;
- Este consiste em uma câmara de metal parcialmente evacuada, que comprime com o aumento da pressão e expande com a diminuição da mesma. Essas alterações são transmitidas a um ponteiro já calibrado a determinadas condições e unidades de medida de pressão.



Barômetro aneróide

# Manômetro

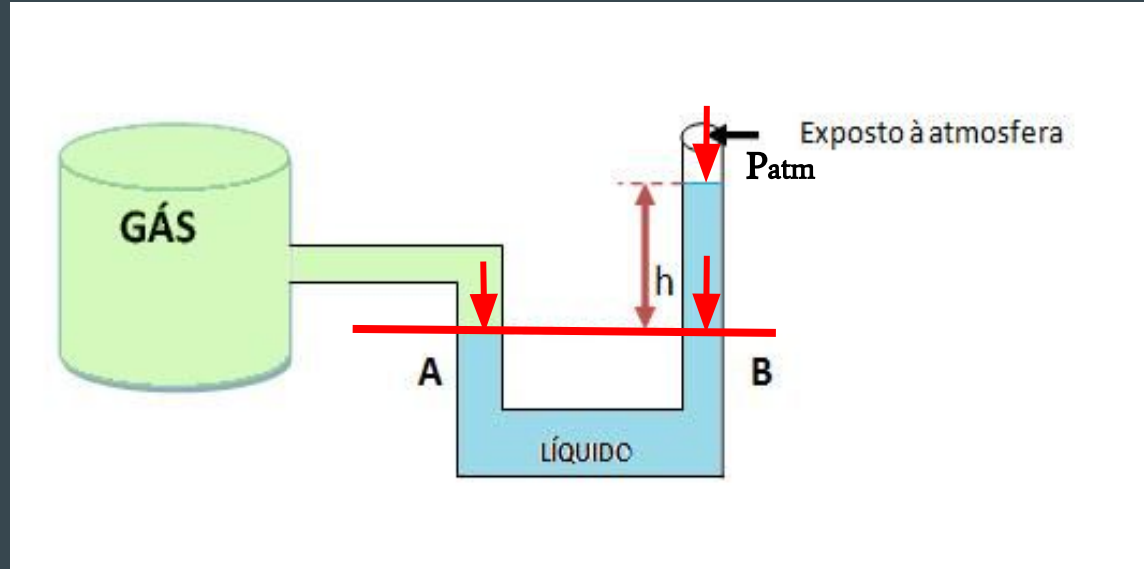
- Os manômetros de pressão são instrumentos utilizados para medições locais de pressão em fluidos;
- Existem diversas construções de manômetros



# Manômetro

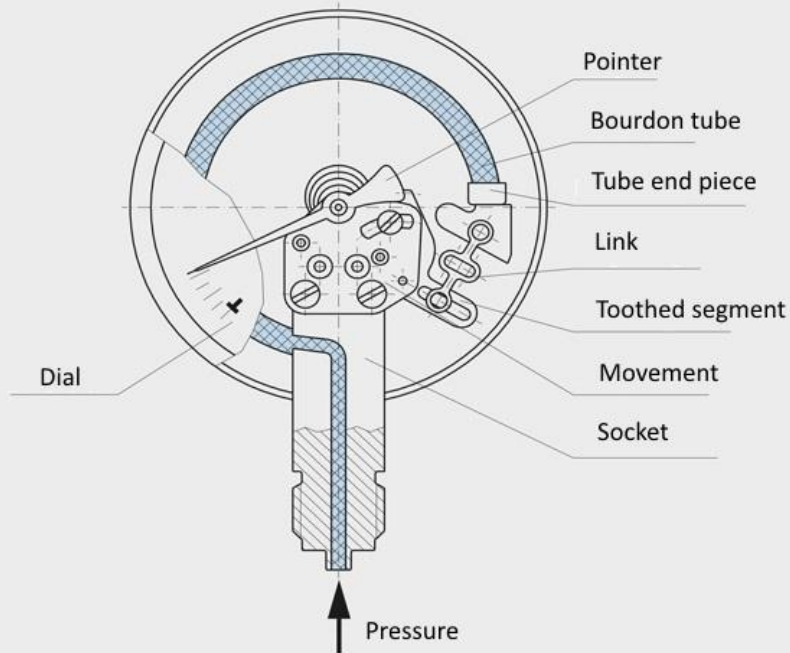
Exemplo:

- Pelo princípio de Stevin:  
 $P_A = P_B$ 
  - $P_B = P_{atm} + \rho gh$
  - $P_A \Rightarrow$  Pressão que o gás exerce no líquido



# Manômetro

- Manômetro com tubo Bourdon

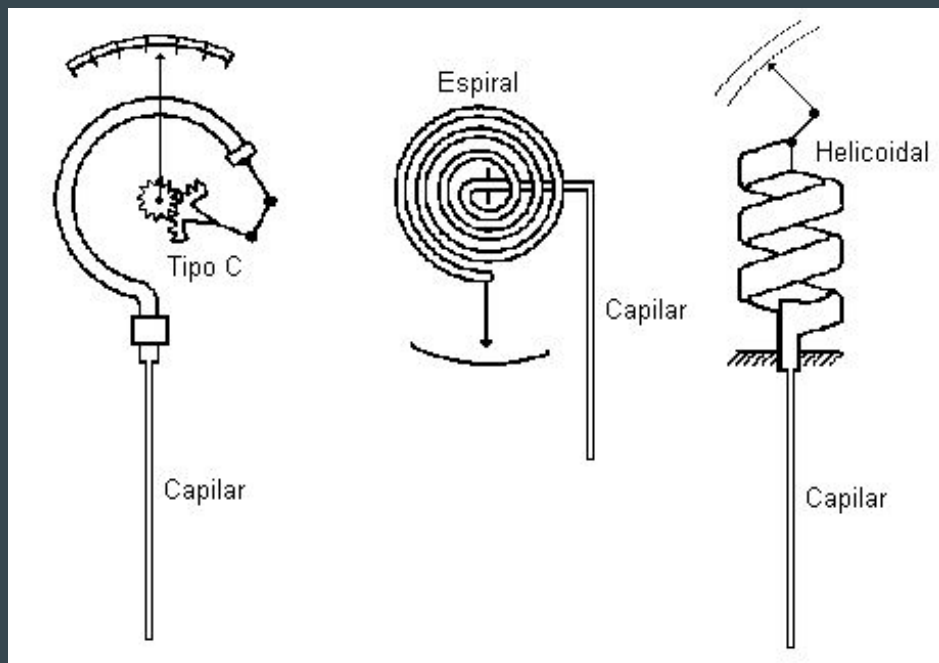


# Manômetro



# Manômetro

Para pressões mais elevadas, são utilizadas variações dos tubos Bourdon (helicoidal ou espiral).



# Transdutor de Pressão

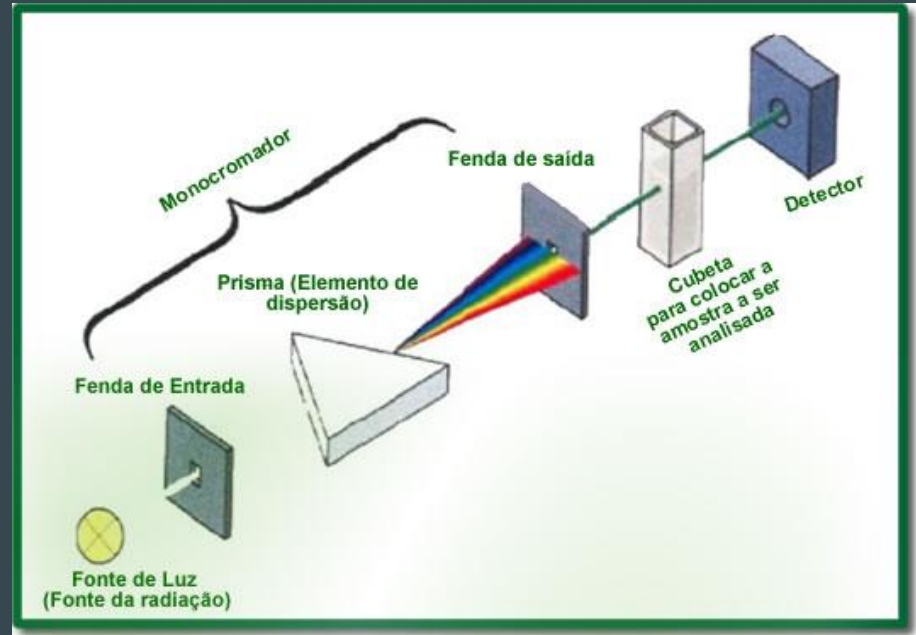
- Um Transdutor de Pressão, ou transmissor de pressão, é um instrumento de medição capaz de converter a pressão em um sinal elétrico analógico.
- Existem diversos tipos de transdutores de pressão, sendo um dos mais comuns o transdutor de base de sensor de deformação/tensão.
- A conversão de pressão em um sinal elétrico nesse tipo de transdutor é obtida através da deformação física de sensores de deformação/tensão. Tal deformação devido à pressão aplicada produzirá uma alteração de resistência elétrica proporcional.





# Medidores de concentração

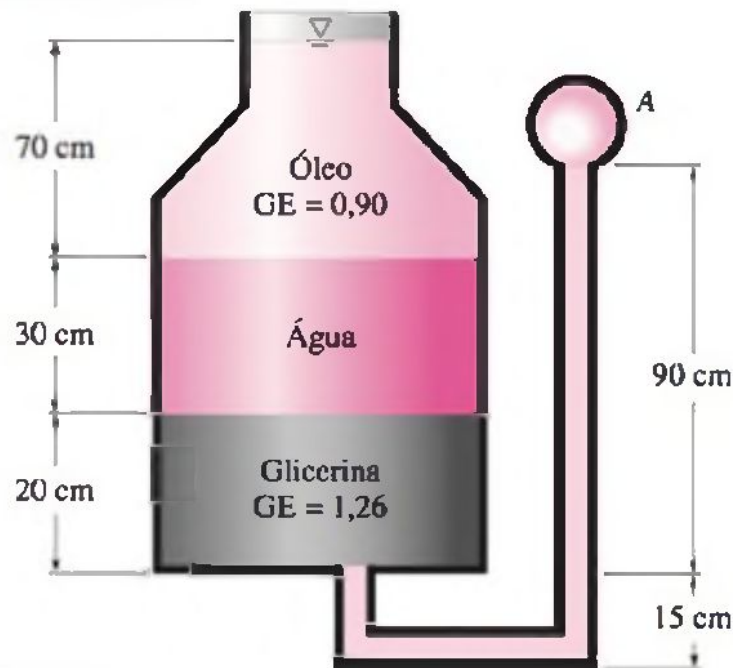
- São aparelhos capazes de medir a concentração de substâncias em um solvente que absorvem luz (energia radiante);
- Um exemplo comum de medidor de concentração seria o espectrofotômetro.
  - A base de seu funcionamento é passar um feixe de luz pelo solvente, fazer a medição da intensidade de luz que chega no detector, e no final comparar com os resultados de uma solução de referência (com concentração conhecida).





# Exercício resolvido

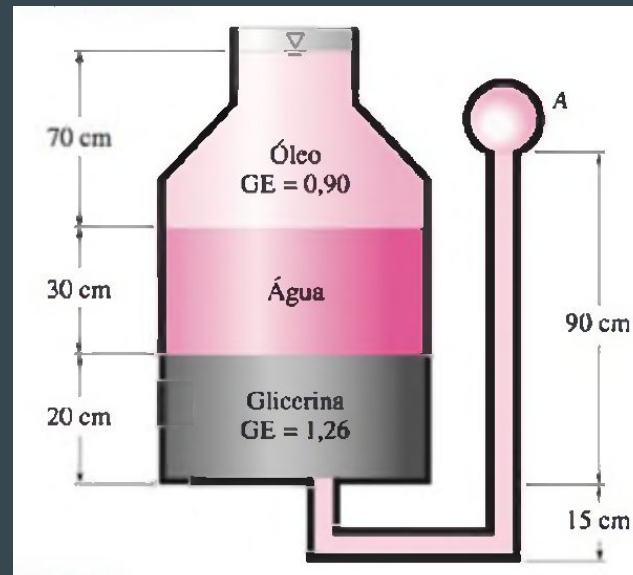
**3-44** Um contêiner com vários fluidos está conectado a um tubo em U, como mostra a Figura P3-44. Para as gravidades específicas e alturas de coluna de fluido dadas, determine a pressão manométrica a A. Determine também a altura de uma coluna de mercúrio que criaria a mesma pressão a A. *Respostas:* 0,471 kPa, 0,353 cm



**FIGURA P3-44**

# Exercício resolvido

- Hipóteses
  - Todos os líquidos são incompressíveis
  - O contêiner está aberto para a atmosfera
- Propriedades
  - Gravidades específicas dadas:
    - 1.26 para glicerina
    - 0.90 para o óleo



# Exercício resolvido

- Percorrendo o tubo começando pela pressão atmosférica, temos:

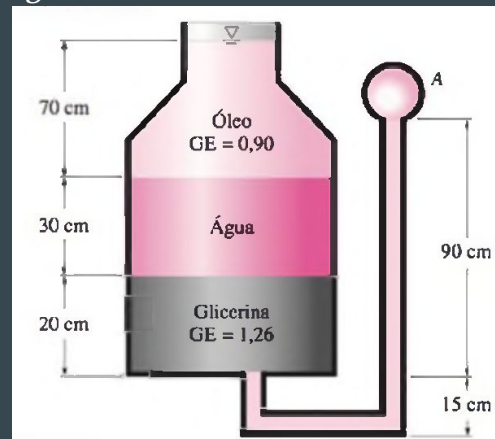
- $P_{\text{atm}} + \rho_{\text{óleo}} gh_{\text{óleo}} + \rho_{\text{água}} gh_{\text{água}} + \rho_{\text{gli}} gh_{\text{gli}} = P_A$

- Aplicando a definição de gravidade específica,

- $P_A - P_{\text{atm}} = SG_{\text{óleo}} \rho_{\text{água}} gh_{\text{óleo}} + SG_{\text{água}} \rho_{\text{água}} gh_{\text{água}} + SG_{\text{gli}} \rho_{\text{água}} gh_{\text{gli}}$

- Reescrevendo a equação, obtemos:

- $P_{A.\text{man}} = g \rho_{\text{água}} (SG_{\text{óleo}} h_{\text{óleo}} + SG_{\text{água}} h_{\text{água}} + SG_{\text{gli}} h_{\text{gli}})$



# Exercício resolvido

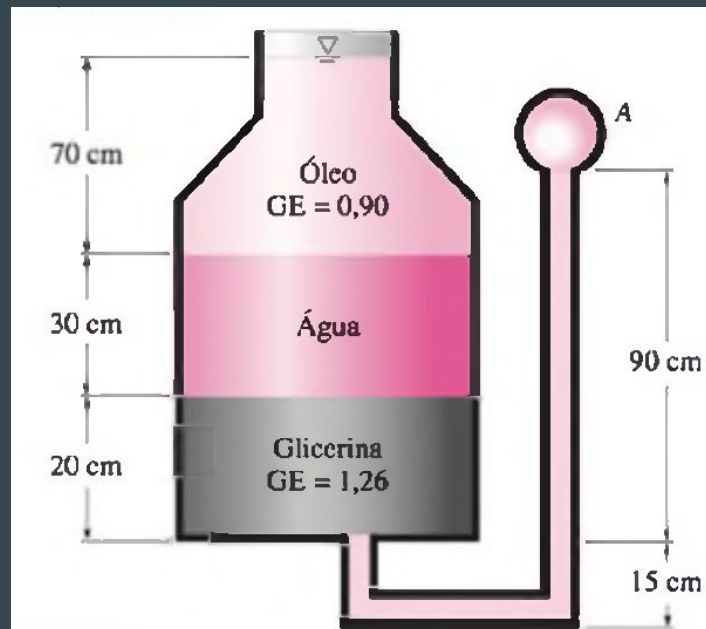
- Aplicando os valores, obtemos a pressão manométrica em A
  - $P_{A.man} = (9.81)(1000)[0.90(0.70) + 1(0.30) + 1.26(0.20-0.90)]$

- $P_{A.man} = 0.471 \text{ kN/m}^2 = 0.471 \text{ kPa}$

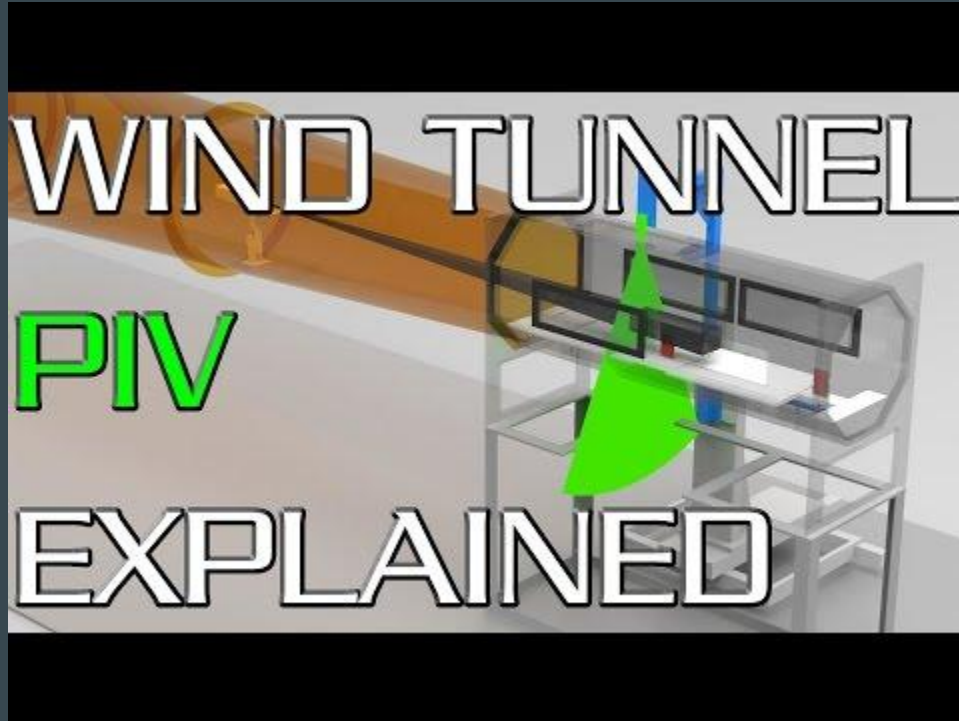
- O equivalente em coluna de mercúrio é:

- $P_{A.man} = \rho_{Hg} g h_{Hg}$

- $h_{Hg} = P_{A.man} / \rho_{Hg} g = 0.00353 \text{ m} = 3.53 \text{ mm}$



# Velocimetria por imagem de partículas (PIV) - visualização: túnel de vento



# Referências

- ÇENGEL, Y. A. / CIMBALA, J. M. Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações – 3a Ed., McGrawHill Education.
- FOX, R. W. / PRITCHARD, P. J. / McDonald, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos - 8a Ed. 2014, LTC.
- Laboratório de Engenharia de Fluidos. PUC-RIO. Disciplina: Métodos Experimentais. Link: <http://lef.mec.puc-rio.br/cursos/metodos-experimentais-graduacao/?lang=pt>. Acesso em: 02/12/2020;
- Velocimetria por Imagens de Partículas (PIV) utilizando Imagens de UltraSom. Link: [http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio\\_resumo2010/relatorios/ctc/mec/MEC-Elizabeth%20M.%20Bittencourt-Bruno%20A.%20de%20Azevedo.pdf](http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2010/relatorios/ctc/mec/MEC-Elizabeth%20M.%20Bittencourt-Bruno%20A.%20de%20Azevedo.pdf) Acesso em: 02/12/2020;
- MEDIÇÃO DE ESCOAMENTOS TURBULENTOS UTILIZANDO VELOCIMETRIA POR IMAGEM DE PARTÍCULAS. Link: [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). Acesso em: 02/12/2020;
- Velocimetria por imagem de partículas. Link: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Velocimetria\\_por\\_imagem\\_de\\_part%C3%ADculas](https://pt.wikipedia.org/wiki/Velocimetria_por_imagem_de_part%C3%ADculas). Acesso em: 02/12/2020;

# Referências

- Particle Image Velocimetry (PIV) Explained - How do we see airflow in wind tunnels? Link: [https://www.youtube.com/watch?v=JbuuhpQCWz8&list=WL&index=218&ab\\_channel=KYLE.ENGINEER](https://www.youtube.com/watch?v=JbuuhpQCWz8&list=WL&index=218&ab_channel=KYLE.ENGINEER). Acesso em: 02/12/2020;
- Particle Image Velocimetry. Link: [https://www.youtube.com/watch?v=uhBDn3brODk&list=WL&index=217&ab\\_channel=MichelvanBiezen](https://www.youtube.com/watch?v=uhBDn3brODk&list=WL&index=217&ab_channel=MichelvanBiezen). Acesso em: 02/12/2020;
- Studying larvaceans using DeepPIV (Particle Image Velocimetry). Link: [https://www.youtube.com/watch?v=0fCnHyxYVMw&list=WL&index=222&ab\\_channel=MontereyBayAquariumResearchInstitute%28MBARI%29](https://www.youtube.com/watch?v=0fCnHyxYVMw&list=WL&index=222&ab_channel=MontereyBayAquariumResearchInstitute%28MBARI%29). Acesso em: 02/12/2020;
- New laser system provides 3D reconstructions of living deep-sea animals and their mucous filters. Link: <https://www.mbari.org/deep-piv-3d-flow/>. Acesso em: 03/12/2020;
- Funcionamiento Manómetro de Bourdon. Link: [https://www.youtube.com/watch?v=fE8AAdXViNM&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?v=fE8AAdXViNM&feature=emb_logo). Acesso em: 04/12/2020;

# Referências

- Novo Mercedes S CLASS 2021 - testes de AERODINÂMICA LOUCA em túnel de vento. Link: <https://youtu.be/wP9xxEOAUPQ>. Acesso em: 02/12/2020;
- MAN - Aerodynamics (English version).Link: [https://www.youtube.com/watch?v=\\_NPNiyR5cWo](https://www.youtube.com/watch?v=_NPNiyR5cWo). Acesso em: 02/12/2020;
- Kit Mola Model no Túnel de Vento do IPT - Simulação de edifício balançando sob ação do vento. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=Vw-wyfKLtrQ>. Acesso em: 02/12/2020;
- iFly -Túnel de Vento. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=uiwQB6qVSsY>. Acesso em: 02/12/2020;
- Por que um Avião Cai? Construí um Túnel de Vento para Ver. Link: <https://www.youtube.com/watch?v=9SrFgItEHHk>. Acesso em: 02/12/2020;
- Espectrofotômetro - Aparelhos de Laboratórios. Link: <https://www.infoescola.com/materiais-de-laboratorio/espectrofotometro/#:~:text=Espectrofot%C3%B4metro%20%C3%A9%20um%20aparelho%20amplamente.energia%20radiante%2C%20em%20um%20solvente>. Acesso em: 04/12/2020.