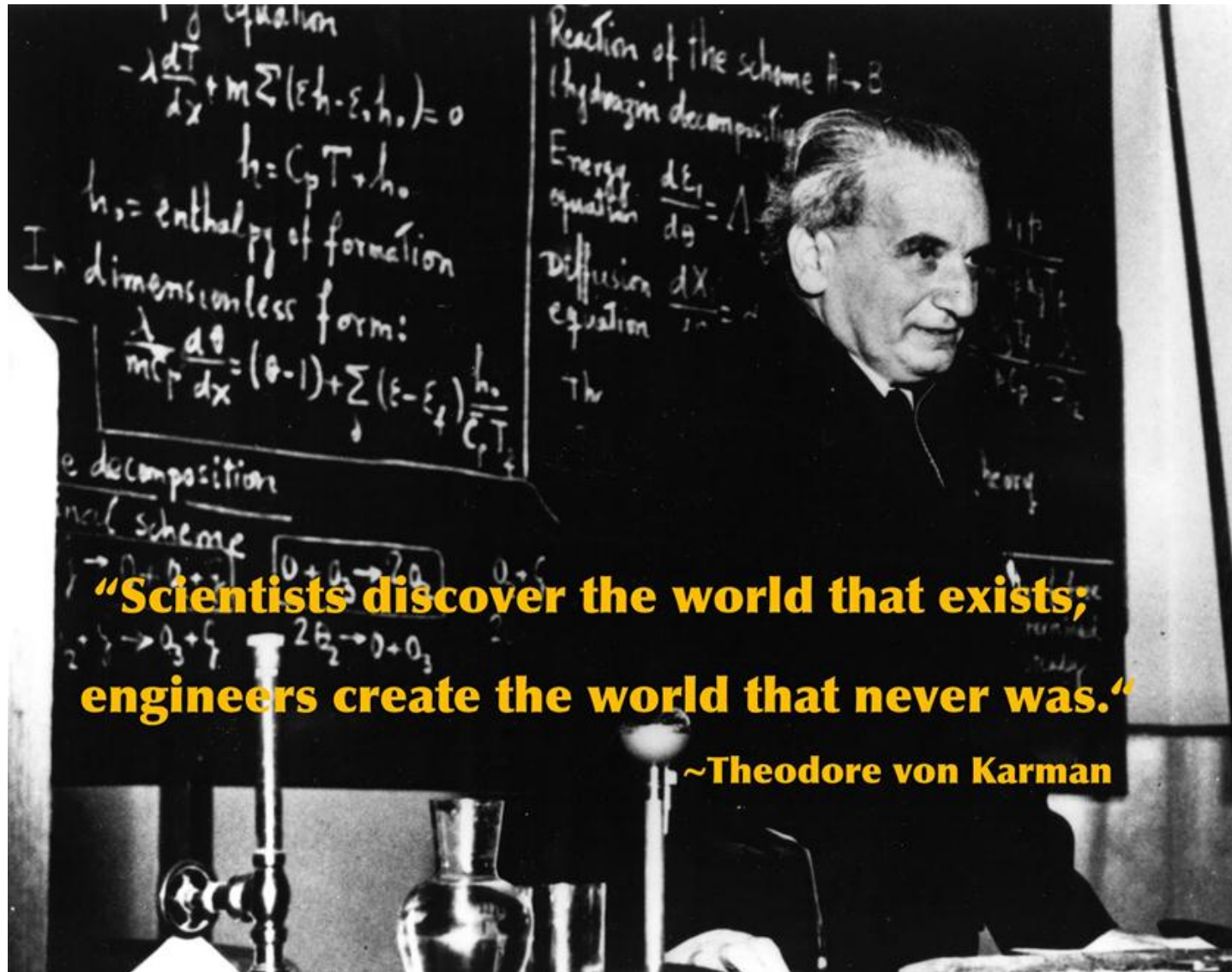


*“Cientistas descobrem o mundo que existe;  
engenheiros criam o mundo que nunca existiu.”*



**“Scientists discover the world that exists;  
engineers create the world that never was.”**

**~Theodore von Karman**

# **Mecânica dos fluidos**

***Prof. Marcos Tadeu Pereira***

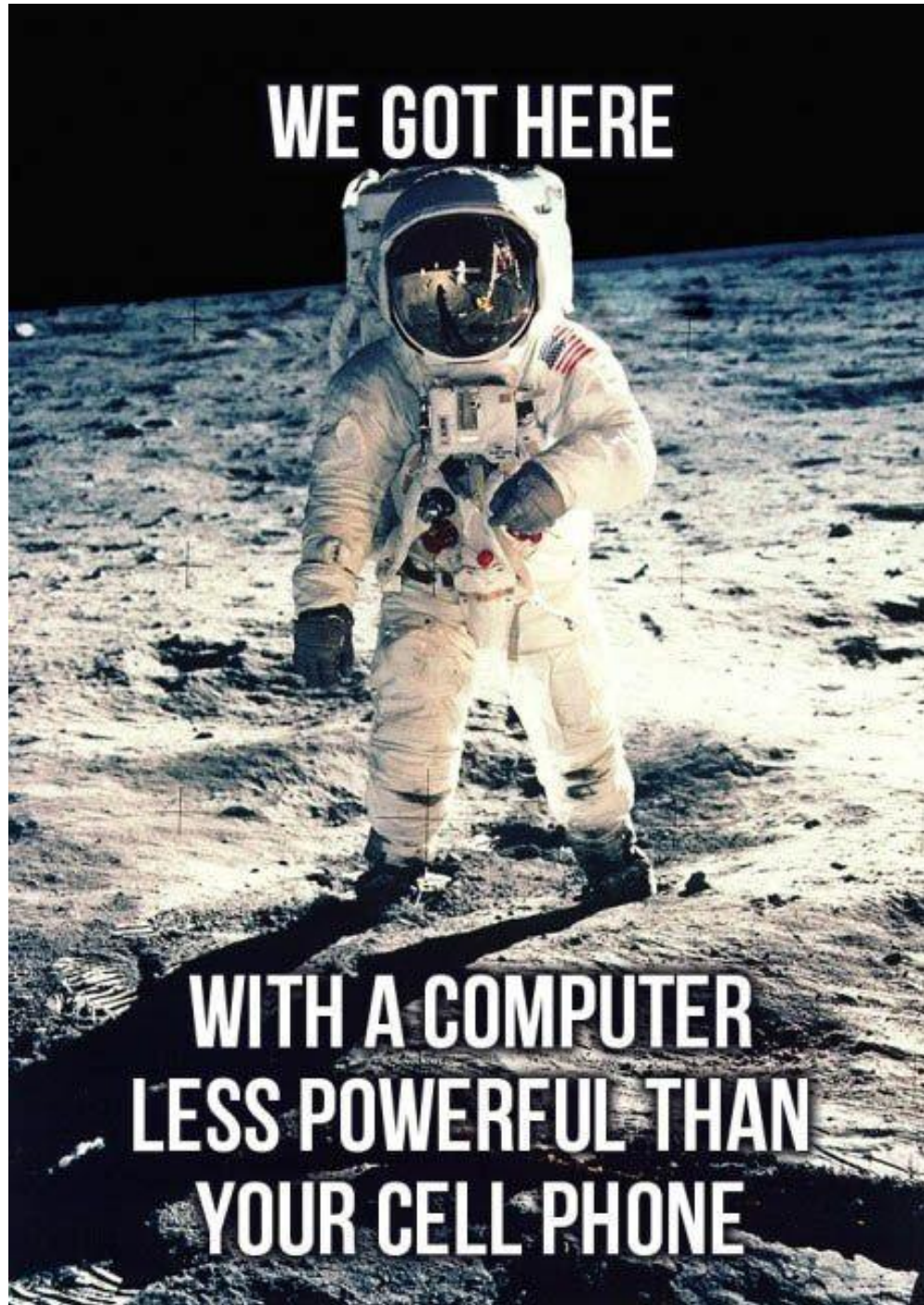
***Engenharia Civil***

***PME 3222 - 2020***



**WE GOT HERE**

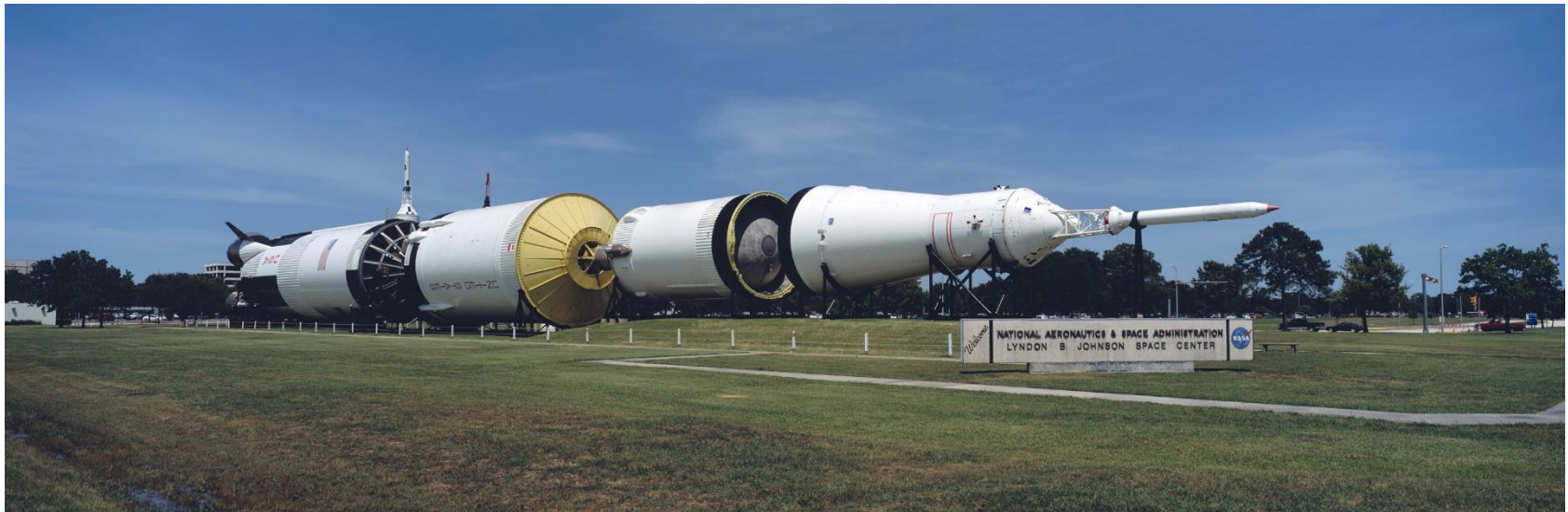
**WITH A COMPUTER  
LESS POWERFUL THAN  
YOUR CELL PHONE**



**And a rocket!**  
**A fucking**  
**huge rocket!**

**E muita MecFlu!**

111m altura  
10m diâmetro  
2.970 toneladas



# BÁSICO EM MECÂNICA DOS FLUIDOS

## EXPERIMENTOS

- 1. Princípio da Conservação da Massa.**
- 2. Primeira Lei da Termodinâmica (princípio da conservação de energia).**
- 3. Segunda Lei da Termodinâmica.  
(irreversibilidades)**
- 4. Segunda Lei de Newton  $F = ma$ .**

Cada uma destas quatro idéias é a generalização de dados experimentais. Nenhuma delas pode se deduzida das outras ou de qualquer outro princípio anterior.

# O meio fluido – Escoamentos internos e externos

- Transporte -
  - Água
  - Esgoto
  - Petróleo
  - Gás Natural
  - Derivados Petróleo
  - Sucos
  - Álcool
  - Ar comprimido
  - Vapor
  - Ar condicionado
- Vento, tornados e furacões
- Movimentos estelares, Galáxias
- Fluidodinâmica dos seres vivos

# Equipamentos e Máquinas de Fluxo

Bombas, ventiladores, compressores, sopradores, turbinas hidráulicas e eólicas, torres de resfriamento, bombas de calor, motores de combustão interna, reatores químicos e nucleares, dutos, válvulas, conexões, filtros, sistemas cardiovasculares e uroexcretores, seiva de plantas, nanotecnologia, etc

# O meio fluido – Sistemas complexos

- Seres vivos
- Instalações industriais (quase todas)
- Água-
  - Captação, reservação
  - Tratamento
  - Distribuição
  - Rios, represas, oceanos
- Efluentes— industriais e urbanos
- Enchentes
- Emissões, Efluentes Gasosos, Aquecimento Global
- Energia – hidrelétrica
  - Eólica
  - Solar (sifonamento)
  - Gás, óleo, álcool
  - Nuclear – água de resfr.(peixe em Angra)

Transporte dutos e bombas



# O meio fluido – Escoamentos externos

- Aviões
- Navios, submarinos
- Plataformas off-shore (dutos e cabos, pré sal)
- Automóveis
- Prédios
- Estruturas civis (pontes, cabos, taludes, etc)
- Turbina eólica
- Pássaros, peixes, insetos

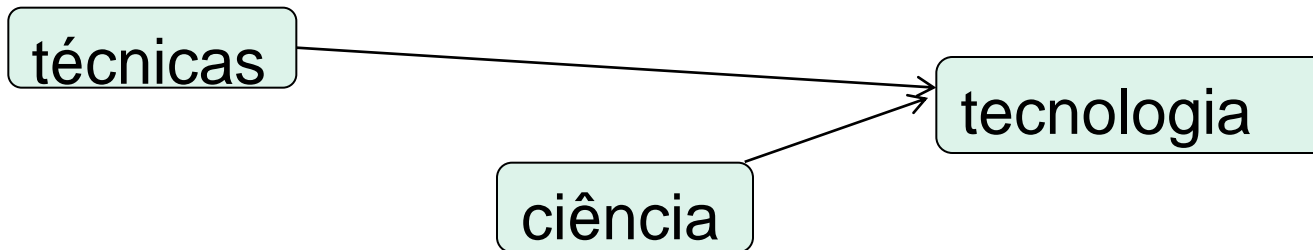
**Conclusão: rendam-se.**

**Run to the hills? Não dá.**

# Origens do conhecimento na Mecânica dos Fluidos

A MecFlu é empírica → experimentos e observação

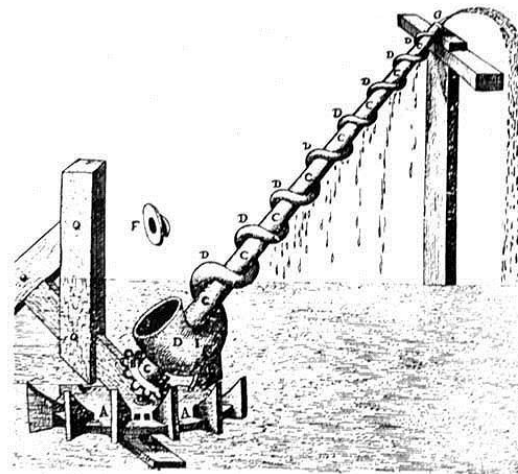
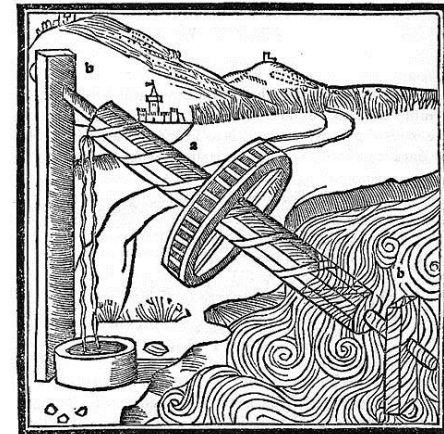
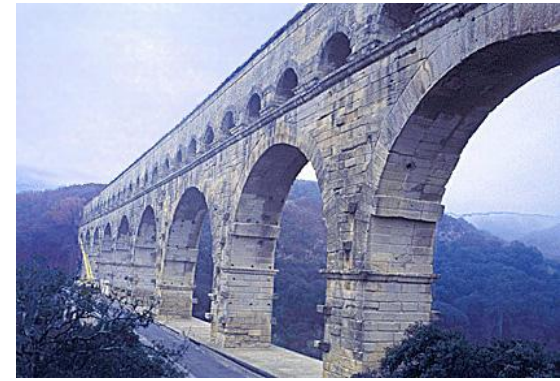
Há 5 mil anos egípcios já possuíam irrigação, canais, cobrança por uso de água



Teoria é extensa (milhares de livros), mas sempre alicerçada em experimentos

# Antiguidade

- Foco na água: aquedutos, irrigação, canais, portos, casas de banho.
- Egípcios 3 mil anos AC já faziam canais de irrigação, bombas, cobravam pela água
- Arquimedes - Grego (287-212 BC). Estática dos fluidos, hidrostática e picnometria ( $\rho$ ). Inventou o parafuso d'água.



# Grandes problemas

- Turbulência
- Viscosidade
- Configurações complexas
- Navier-Stokes
- Rugosidade





16 15:40





**Sabesp perde de 18 a 35% de toda água tratada, por vazamento, e consome 2% de toda energia no ESP em bombeamento.**

**Necessidade de novas tecnologias, disruptivas, para realizar os processos com maior eficiência energética**



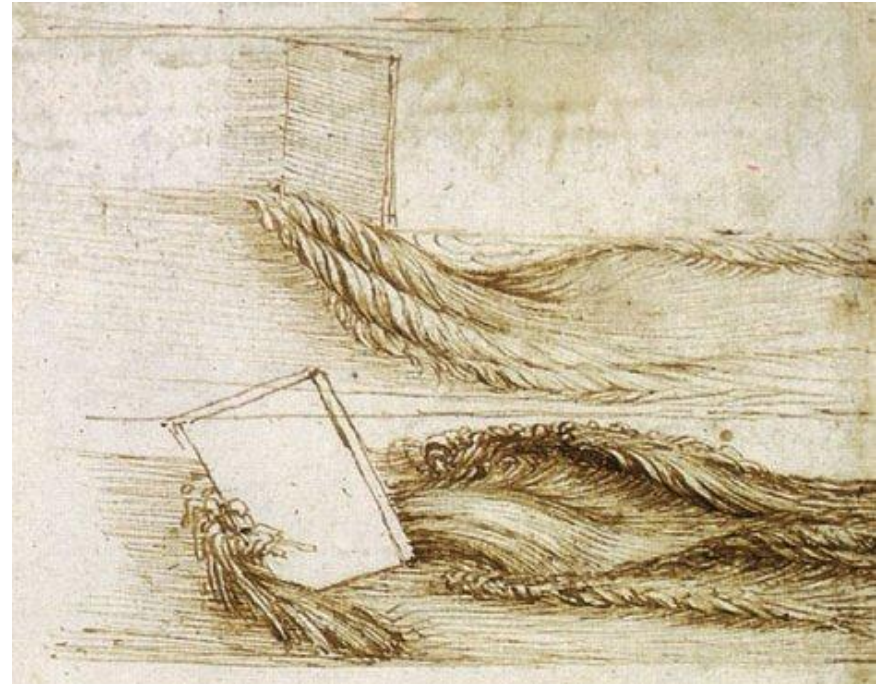






# Leonardo da Vinci - (1452-1519)

- da Vinci foi um grande observador de fenômenos naturais, reconhecia sua forma e estrutura.
- Planejou e supervisionou a construção de canais e portos.
- *Del moto e misura dell'acqua* vórtices, quedas d'água, jatos livres, interferências de ondas e muitos outros fenômenos só recentemente observados (vortex shedding por ex.)













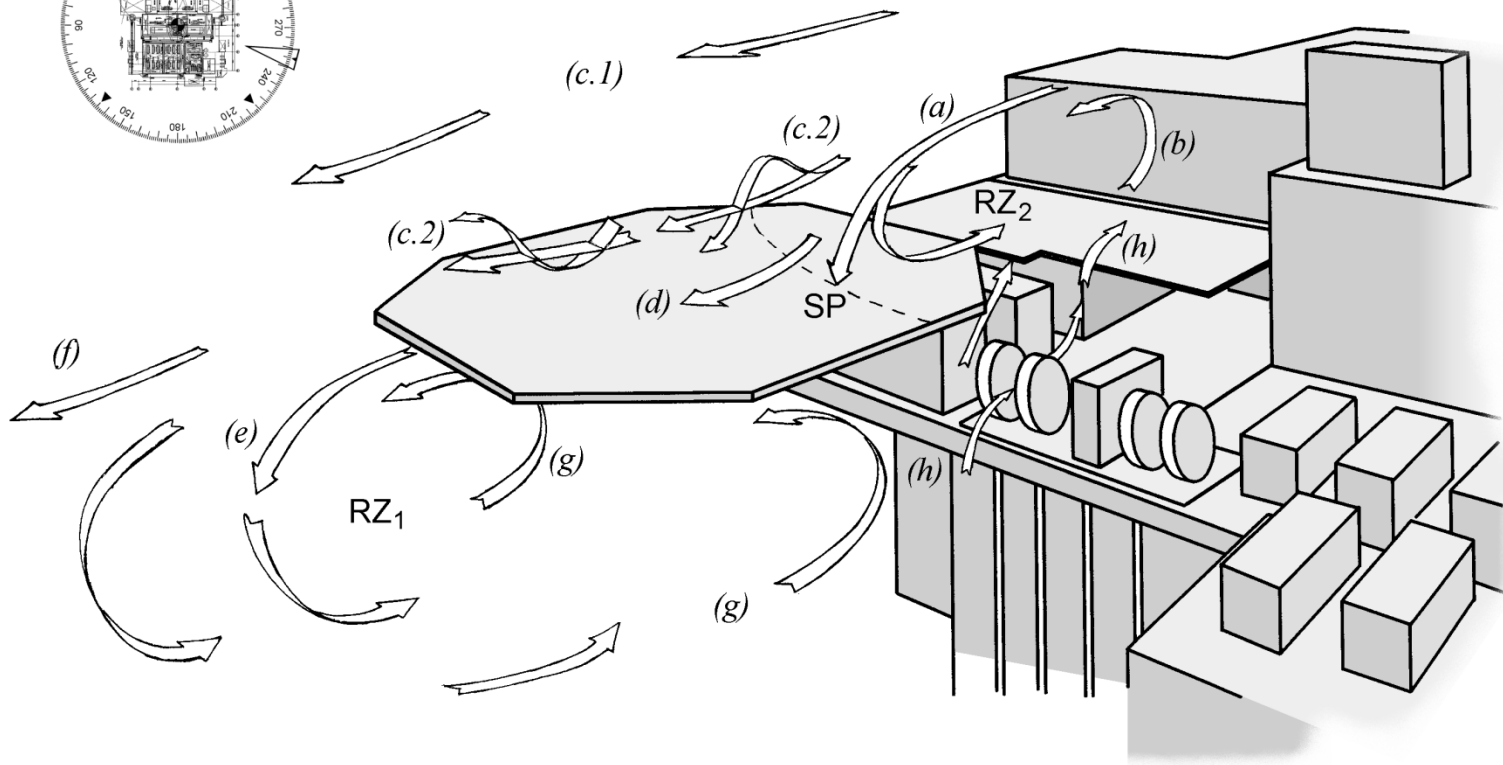
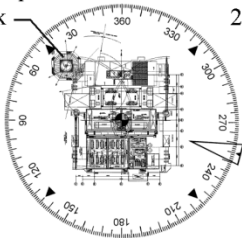




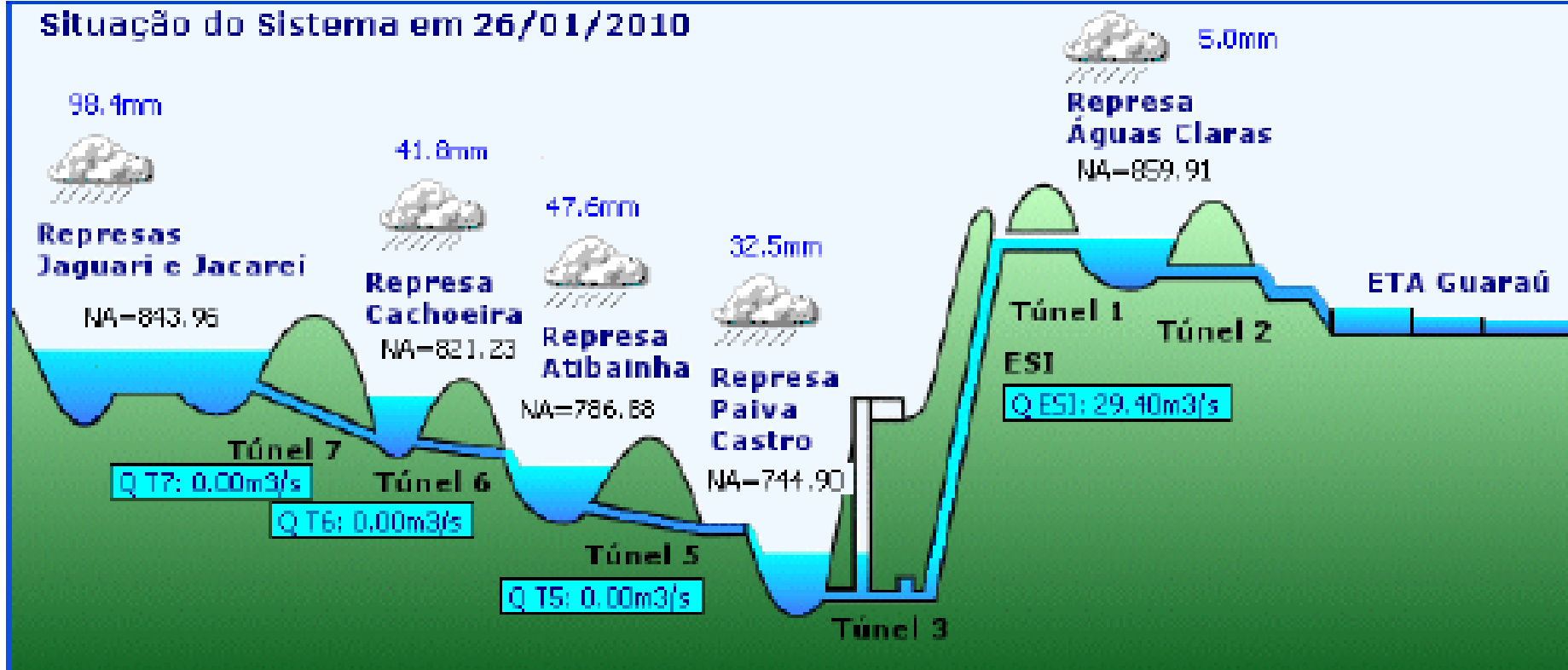




Helicopter Deck  
Wind Direction: 255deg



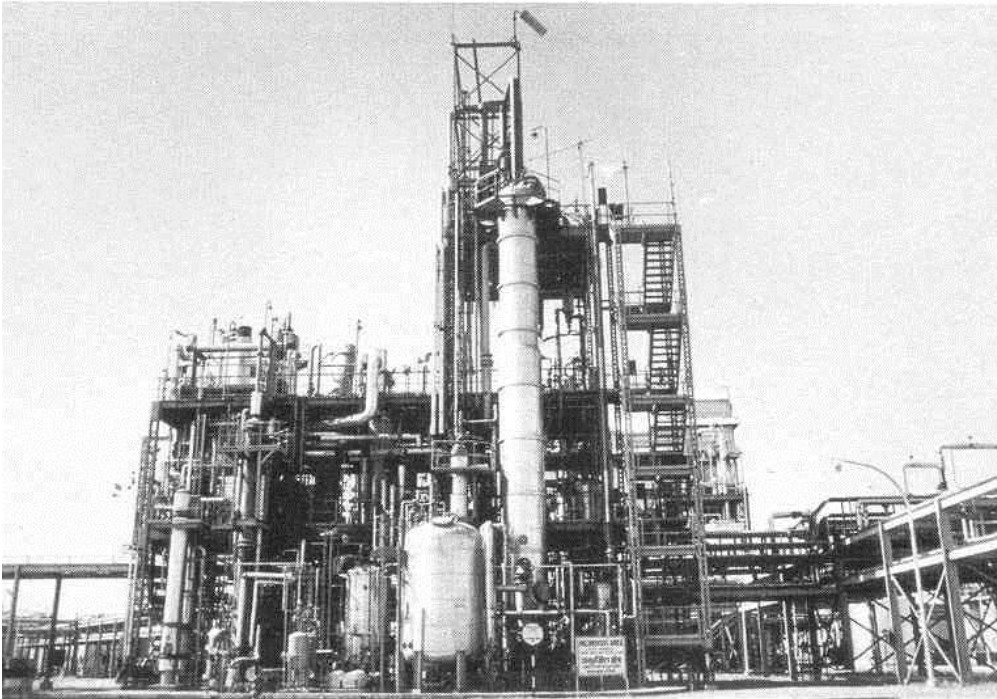
# Situação do Sistema em 26/01/2010



# Desastre de Bhopal 3/12/84

Union Carbide: planta de pesticida produzia Metil Iso Cianato (MIC). Entrou água e produziu pluma tóxica

Pior acidente industrial de história: 4,000 mortos, 500,000 afetados



## Planta próxima à cidade

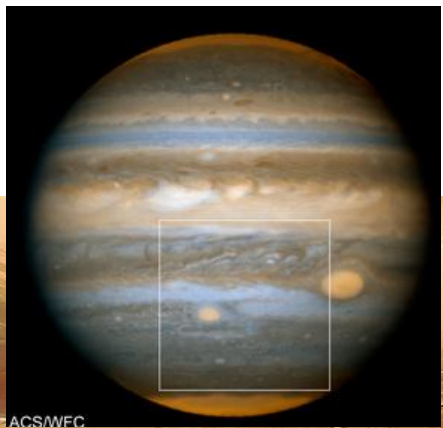
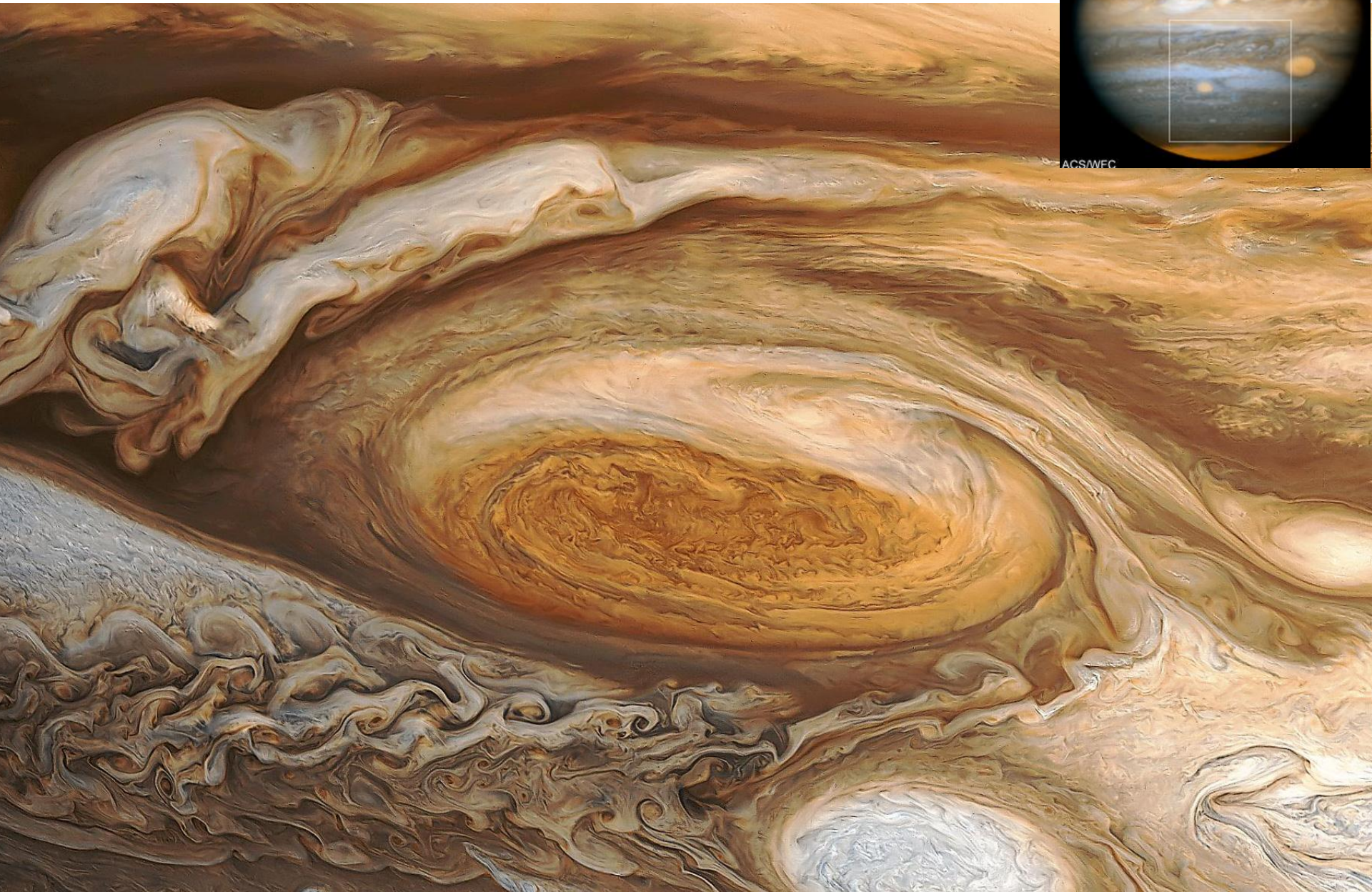
$$c(x, y, z) = \frac{J}{\pi \sigma_y \sigma_z u} e^{\left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right]} e^{\left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{z}{\sigma_z} \right)^2 \right]}$$



**Pagaram US\$ 0,43 a cada envolvido**

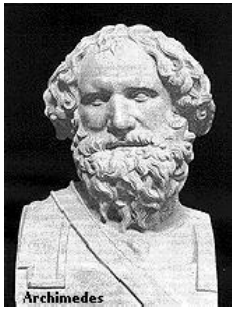






ACS/WEC

# Nomes da Mecânica dos Fluidos



Archimedes  
(C. 287-212 BC)



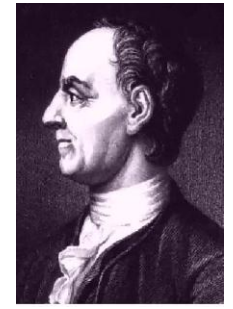
Newton  
(1642-1727)



Leibniz  
(1646-1716)



Bernoulli  
(1667-1748)



Euler  
(1707-1783)



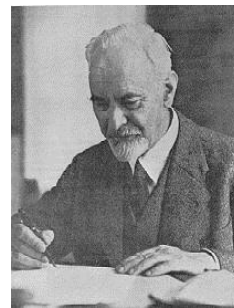
Navier  
(1785-1836)



Stokes  
(1819-1903)



Reynolds  
(1842-1912)



Prandtl  
(1875-1953)



Taylor  
(1886-1975)



Kolmogorov  
(1903-1987)

# Diferenças entre sólidos e fluidos

# Conceito de fluidos – corpos materiais

<b>Sólidos</b>	<b>Fluidos</b> – líquidos e gases
Partículas c/ligações <b>rígidas</b>	Partículas “ <b>livres</b> ”
Resistem a tensões de tração normal	<b>Não</b> resistem a tensões de tração normal
Moléculas pouco espaçadas e forças de coesão intermoleculares fortes	Moléculas espaçadas e forças intermoleculares fracas
Resistem à tensão de cisalhamento s/ se mover ou deformar de forma contínua	<b>Não</b> resistem à tensão de cisalhamento, deformam-se e se movem de forma contínua

**Definição de fluido:** substância que se deforma de modo **contínuo** quando submetida a uma tensão de cisalhamento qualquer

**O Continuum**

# O Continuum

Assume que os fluidos estão continuamente distribuídos em toda a região de interesse. O fluido é tratado como um ***continuum***.

Modelo do ***continuum*** → não ter que tratar com interações moleculares diretamente. Estas interações serão tratadas indiretamente, de forma macroscópica, como **viscosidade** ou **massa específica**



# O Continuum

Uma maneira de ver se o modelo do *continuum* é aceitável é usar o número de Knudsen:  $K_n = \frac{\lambda}{d}$

( $d$  sendo um comprimento característico como largura de um canal;  $\lambda$  livre caminho médio das moléculas)

- Se  $K_n = \frac{\lambda}{d} < 0.001$ , escoamento pode ser considerado no *continuum* e valem as leis da mecflu.
- Gases à  $P_{\text{ambiente}}$ ,  $\lambda \approx 6,5 \times 10^{-8} \text{ m} \longrightarrow d \sim 6,5 \times 10^{-5} \text{ m}$
- Para água  $\lambda \approx 3,1 \times 10^{-10} \text{ m}$

- **Abordagem científica:** Estuda o comportamento de moléculas individuais quando tenta descrever o comportamento dos fluidos
- **Abordagem de Engenharia:** Caracterização do comportamento ao considerar os valores médios, ou macroscópicos, da quantidade de interesse, onde a média é avaliada sobre um pequeno volume contendo um grande número de moléculas
- As propriedades ( $\rho$ ,  $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $T$ ,  $P$ , etc.) variam de modo contínuo (sem “buracos”) nos meios fluidos

# **Dimensões, Homogeneidade dimensional**

# Homogeneidade Dimensional

- Todas equações devem ser dimensionalmente homogêneas.
- Atenção à **ANÁLISE DIMENSIONAL**, uma das 3 técnicas para resolver problemas em Mec-Flu (as outras são a Análise Integral e a Análise Diferencial)

# **Sistemas de unidades e fatores de conversão**

# Tabela de conversão entre algumas unidades de pressão

	Kgf/cm <sup>2</sup>	lbf/pol <sup>2</sup>	BAR	Pol Hg	Pol H <sub>2</sub> O	ATM	mmHg	mmH <sub>2</sub> O	kpa
Kgf/cm <sup>2</sup>	1	14,233	0,9807	28,96	393,83	0,9678	735,58	10003	98,0665
lbf/pol <sup>2</sup>	0,0703	1	0,0689	2,036	27,689	0,068	51,71	70329	6,895
BAR	1,0197	14,504	1	29,53	401,6	0,98692	750,06	10200	100
Pol Hg	0,0345	0,4911	0,03386	1	13,599	0,0334	25,399	345,40	3,3863
Pol H <sub>2</sub> O	0,002537	0,03609	0,00249	0,07348	1	0,002456	1,8665	25,399	0,24884
ATM	1,0332	14,696	1,0133	29,921	406,933	1	760,05	10335	101,325
mmHg	0,00135	0,019337	0,00133	0,03937	0,5354	0,001316	1	13,598	0,13332
mmH <sub>2</sub> O	0,000099	0,00142	0,00098	0,00289	0,03937	0,00009	0,07353	1	0,0098
Kpa	0,010197	0,14504	0,01	0,29539	4,0158	0,009869	7,50062	101,998	1

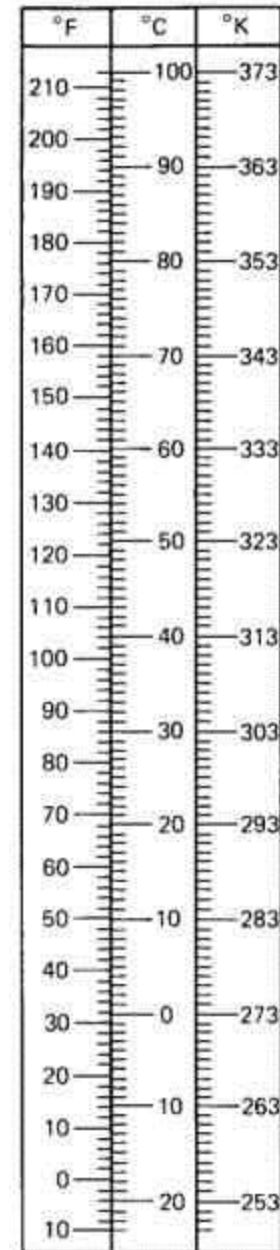
H<sub>2</sub>O à 60°F

Hg à 32°F

# Escala de temperatura

$$^{\circ}\text{C} = \frac{^{\circ}\text{F} - 32}{1,8}$$

$$^{\circ}\text{F} = (1,8 \times ^{\circ}\text{C}) + 32$$



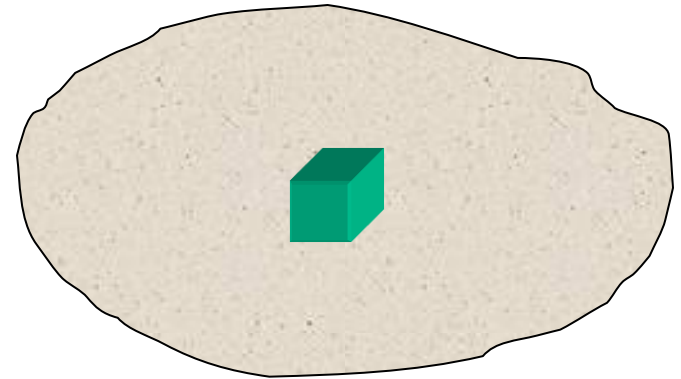
# Massa específica



## Massa específica $\rho$

$$\rho = \frac{dm}{dV} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V}$$

SI  $\rightarrow$  kg/m<sup>3</sup>



## Volume específico $V = \frac{1}{\rho}$

**Densidade D**: relação entre a massa específica de uma substância e a massa específica da água. É um número puro.

## Peso específico $\gamma$

$$\gamma = \rho g = \frac{dm g}{dV}$$

EXERCICIO

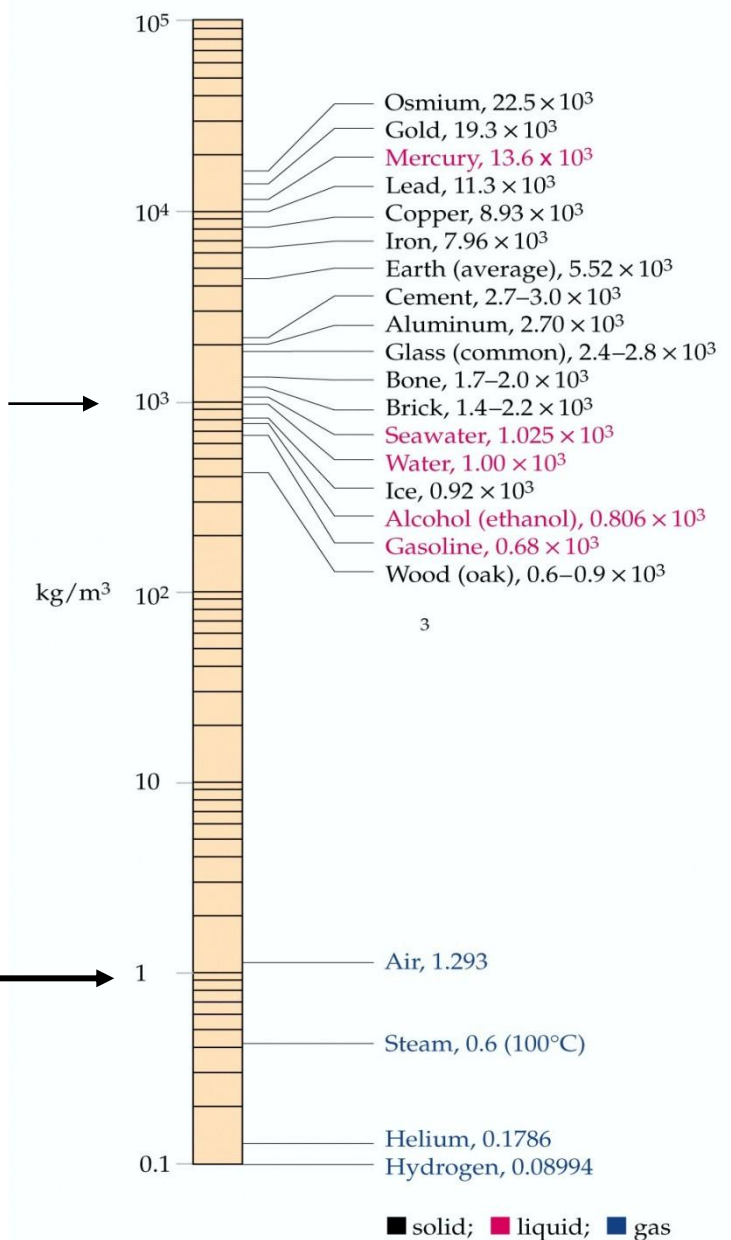
# Massa específica

**TABLE 13-1**  
Densities of Selected Substances

$$\rho = \frac{dm}{dV}$$

Massa específica da água a 4°C é 1000 kg/m³ [1 kg/l] [1 g/cm³]

A massa específica do ar a 0°C e 1 atm de pressão é 1.293 kg/m³



# Massa Específica da água em função da temperatura

Temp (°C)	Density (g/cm³)
30	0.9957
20	0.9982
10	0.9997
4	1.0000
0	0.9998
-10	0.9982
-20	0.9935
-30	0.9839

# Tensão

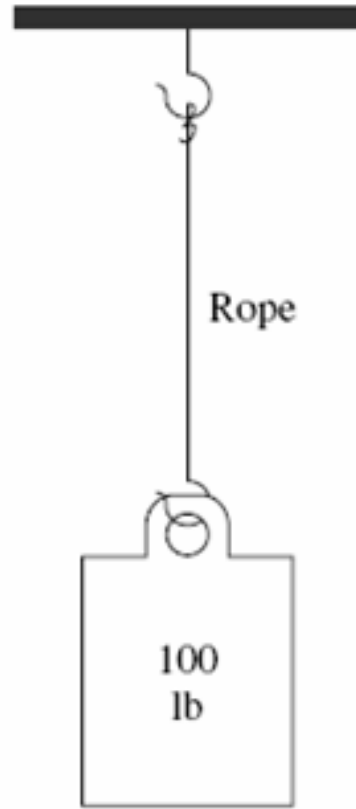
# Tensões: Forças normalizadas por área

- **Tração**
- **Compressão**
- **Cisalhamento**

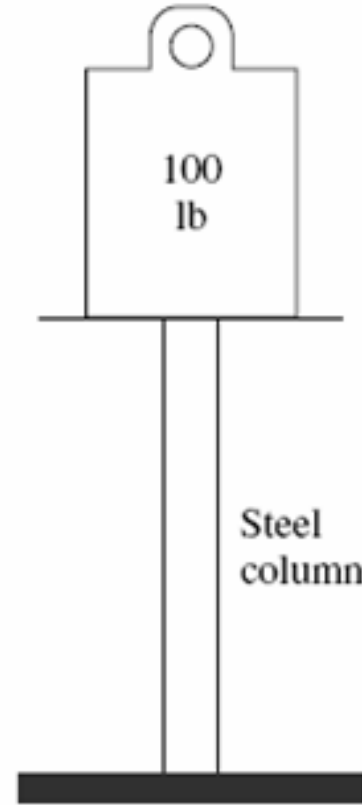
Unidades:

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

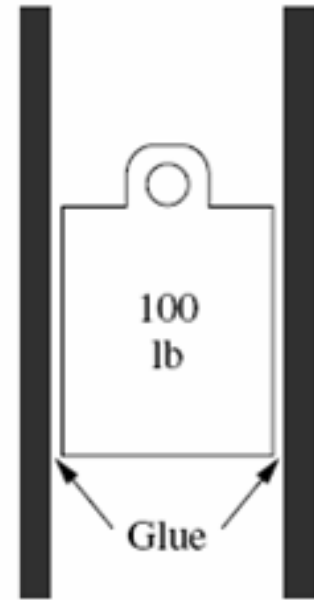
$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2$$



(a)



(b)



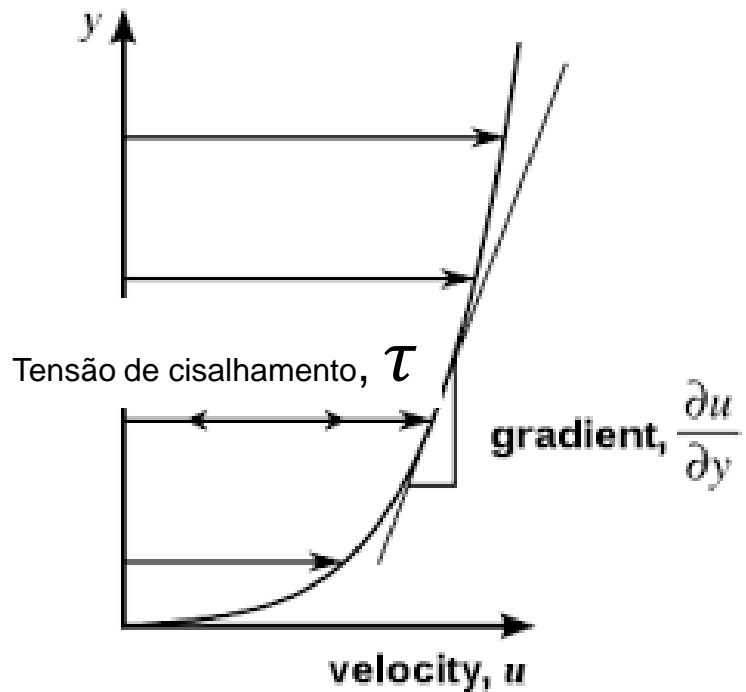
(c)

# Viscosidade

# Viscosidade

- Viscosidade: resistência ao se mover uma camada de líquido contra outra. “Equivale” ao atrito na mecânica dos sólidos
- $\mu$  Coeficiente de viscosidade = viscosidade dinâmica = viscosidade absoluta = **viscosidade**  
 $[\mu] = (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2$  or  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

# Lei de Newton da viscosidade



$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

# A viscosidade é importante para

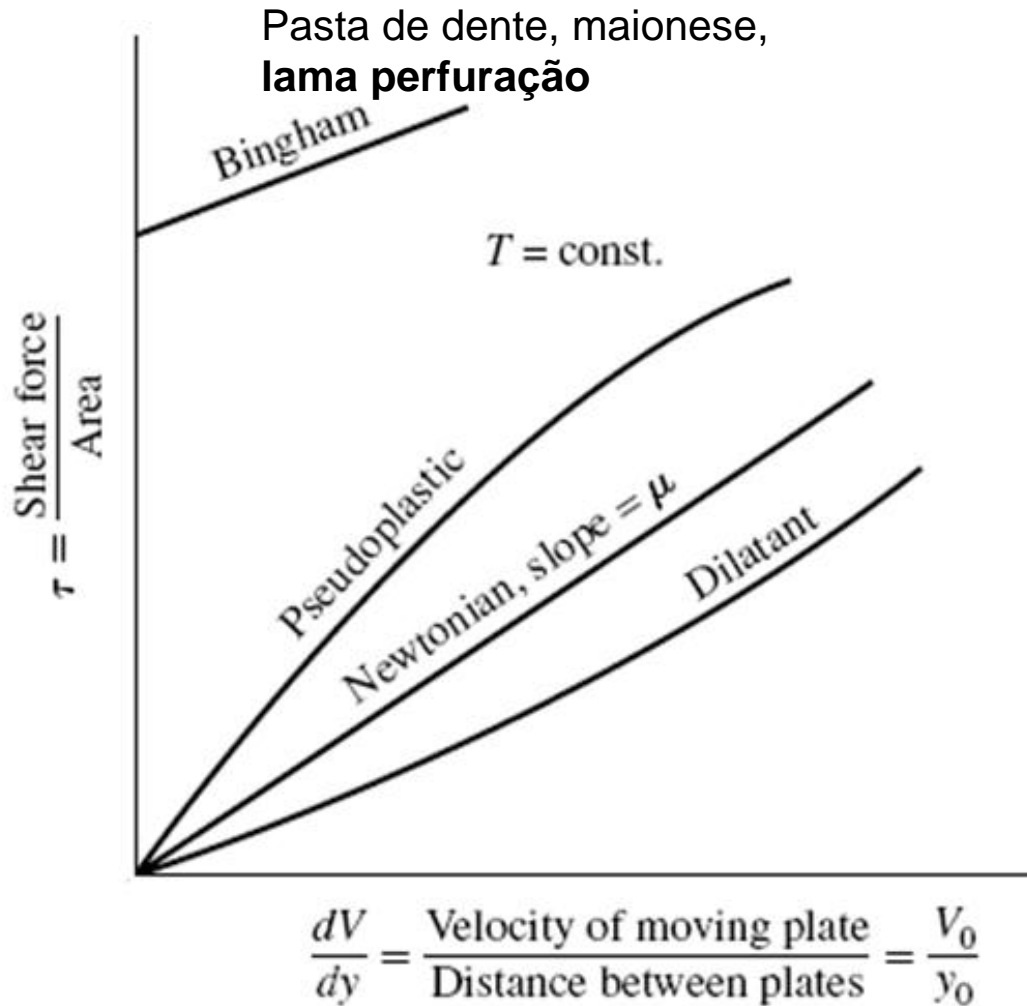
- determinar a vazão de fluidos em dutos
- determinar perdas de energia associadas com o transporte de fluidos em dutos e canais
- **Princípio da aderência completa:**  
por causa da viscosidade, nas fronteiras (paredes), as partículas de fluido aderem às paredes, e a velocidade do fluido é zero relativa à parede



# Viscosidade Cinemática

- 
- **Viscosidade Cinemática é o modo mais comum de medir viscosidade: é medida pela quantidade de tempo necessária para que um volume fixo de óleo escoe por um tubo capilar.**
- $\nu = \mu/\rho$        $[\nu] = \text{m}^2/\text{s} = 10^6 \text{cSt (centistokes)}$
- **Viscosidade dinâmica**
- $[\mu] = \text{Ns}/\text{m}^2 = \text{Pa}\cdot\text{s} = \text{cP (centipoise)}$

# Reologia de fluidos Newtonianos e não Newtonianos



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Fluidos newtonianos}$$

**Pseudoplástico:** soluções de moléculas gdes em solventes. Ex gel de cabelo (por contraste com glicerina ou xarope de milho): gel é mais duro de deixar cair da mão, mas desliza melhor qdo friccionado entre dedos.

**Dilatante:** ex. maizena + água (suspensões coloidais e floculação). Vídeos: [walking on starch](#), youtube

Taxa de cisalhamento

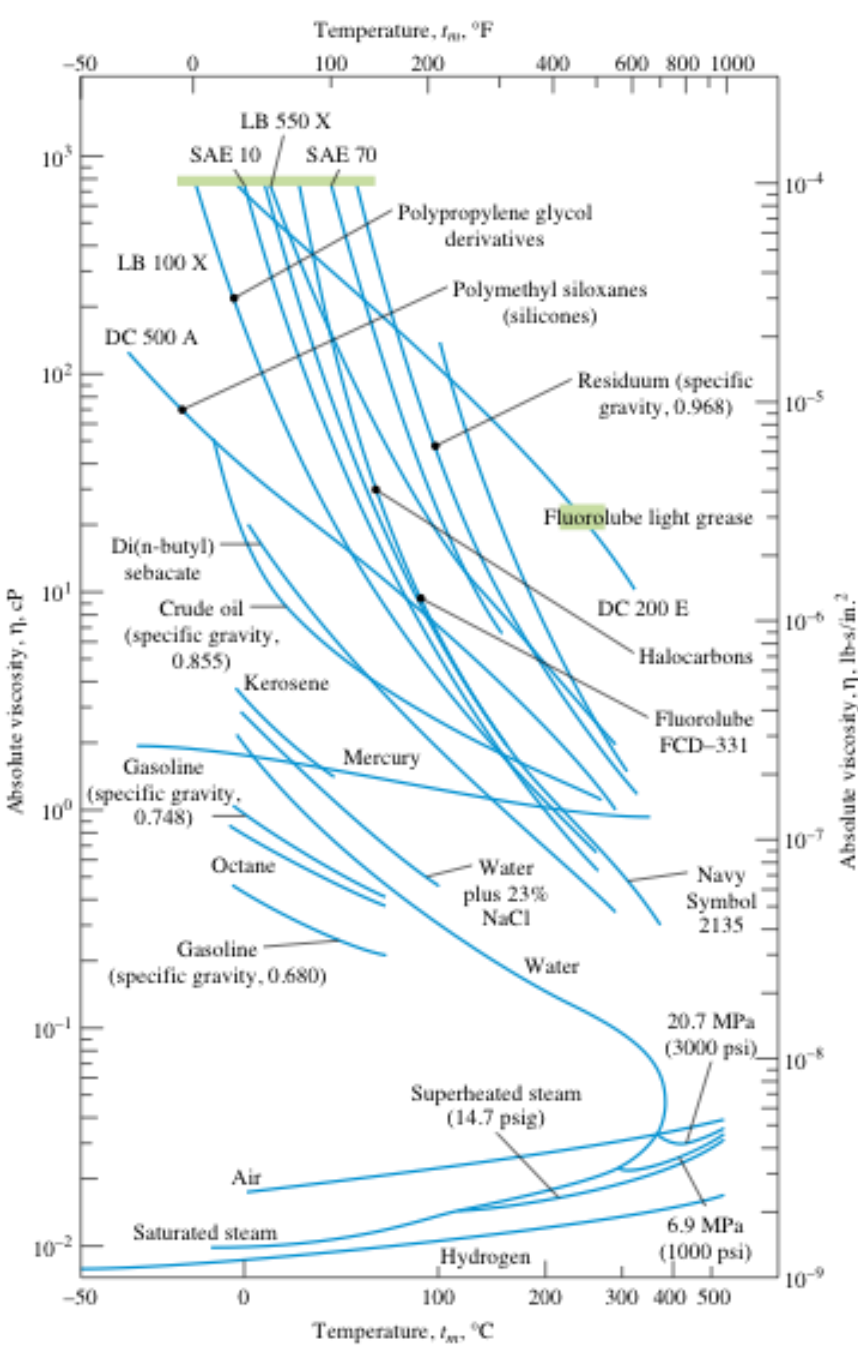
25/01/2019 12:28:21 Sext



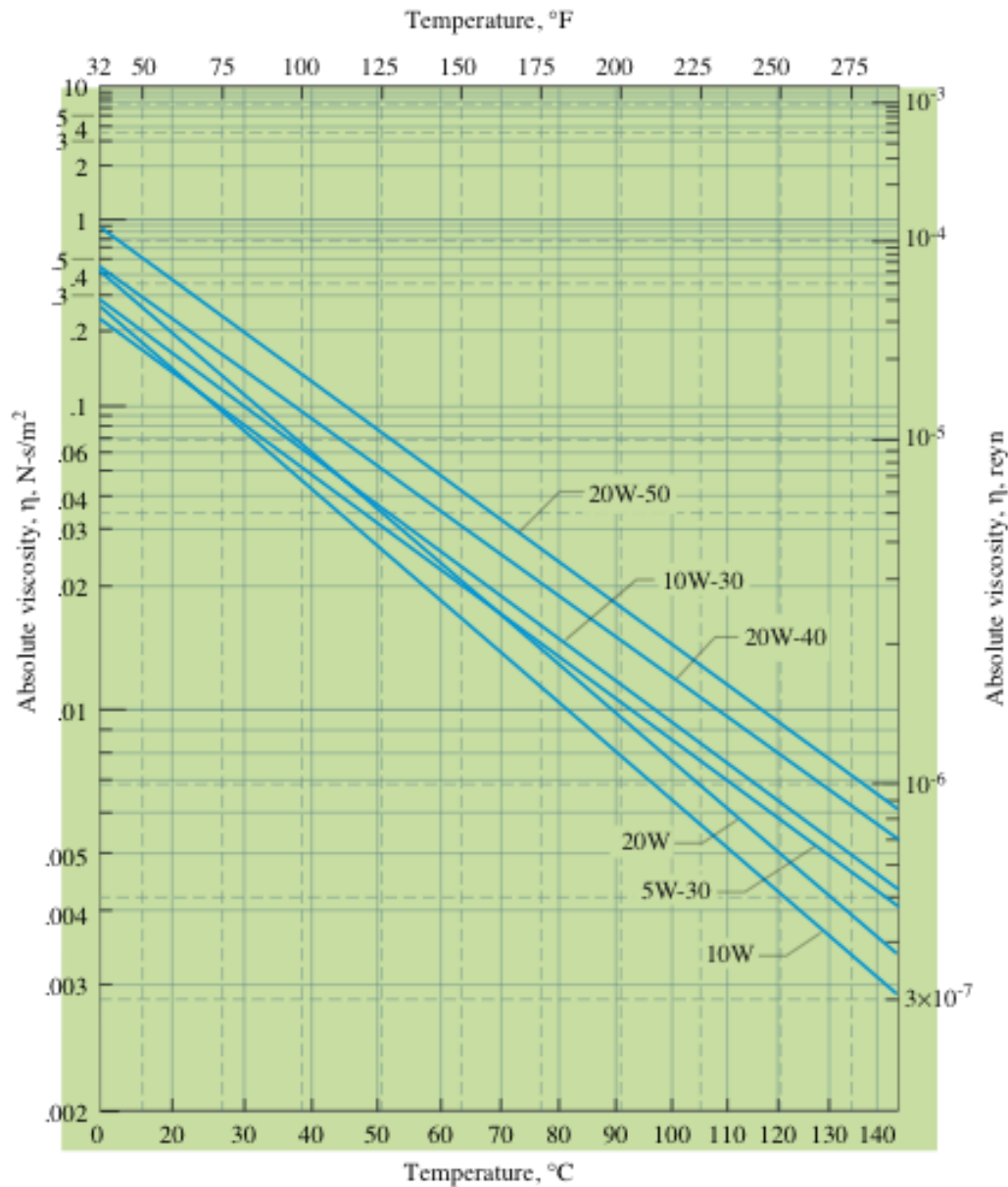
B1 - CAM1 - Barragem

AO VIVO





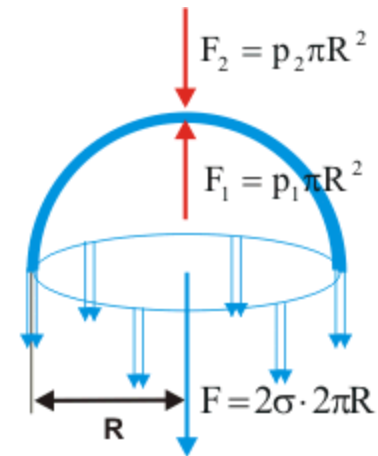
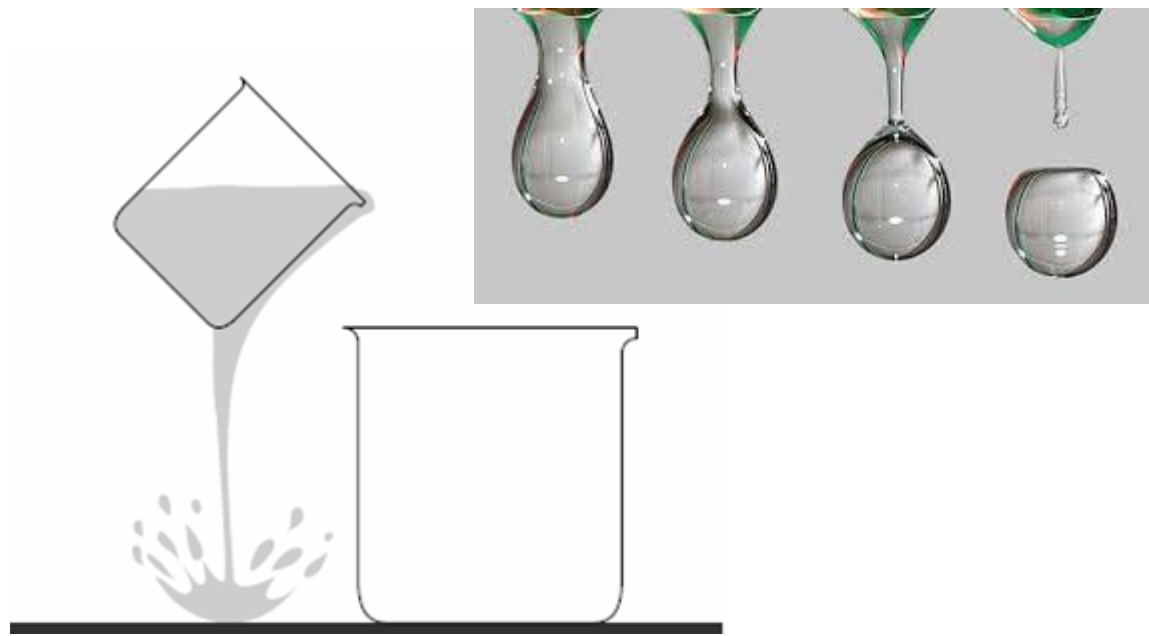
Dados de Viscosidade absoluta para diversos fluidos e temperaturas



# Viscosidade de óleos SAE Multigrade à pressão atmosférica

EXERCICIOS

# Tensão superficial



*Gotas  
≠ bolhas*

No equilíbrio  $F_1 = F_2 + F \Rightarrow p_1 \pi R^2 = p_2 \pi R^2 + 2\sigma \cdot 2\pi R$

$$p_1 = p_2 + \frac{4\sigma}{R}$$

A tensão superficial é uma propriedade que resulta de forças atrativas entre moléculas.

Ela se manifesta apenas na interface de líquidos com gases, com outros líquidos ou com superfícies sólidas.

Numa interface as moléculas exercem uma força que tem uma resultante na camada superficial.

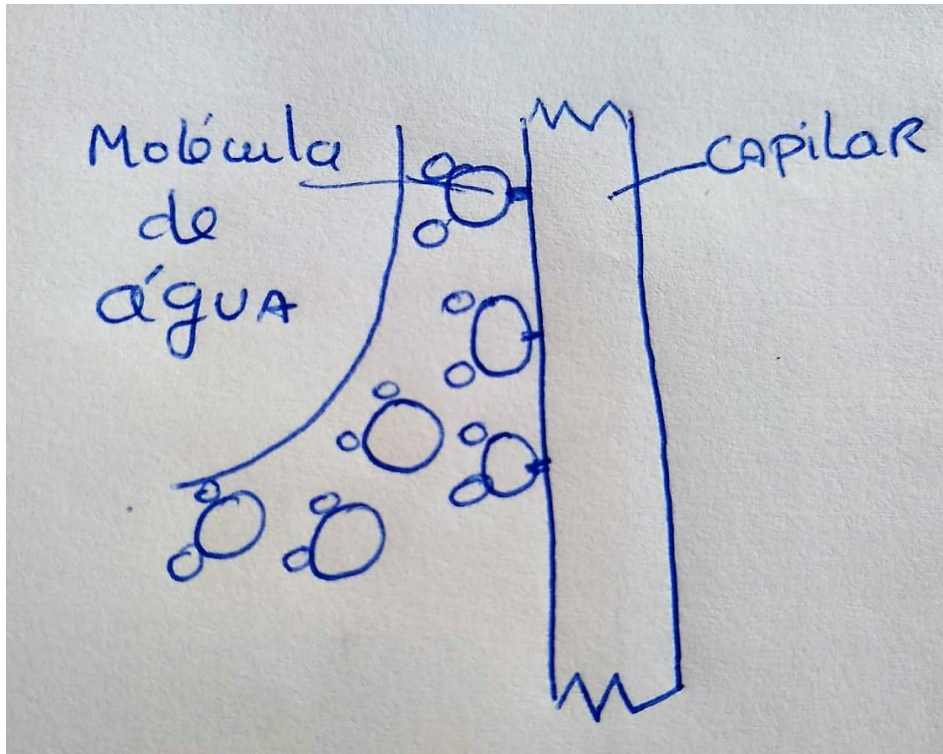


# Capilaridade

**Capilaridade é a subida espontânea de um líquido em um tubo fino**

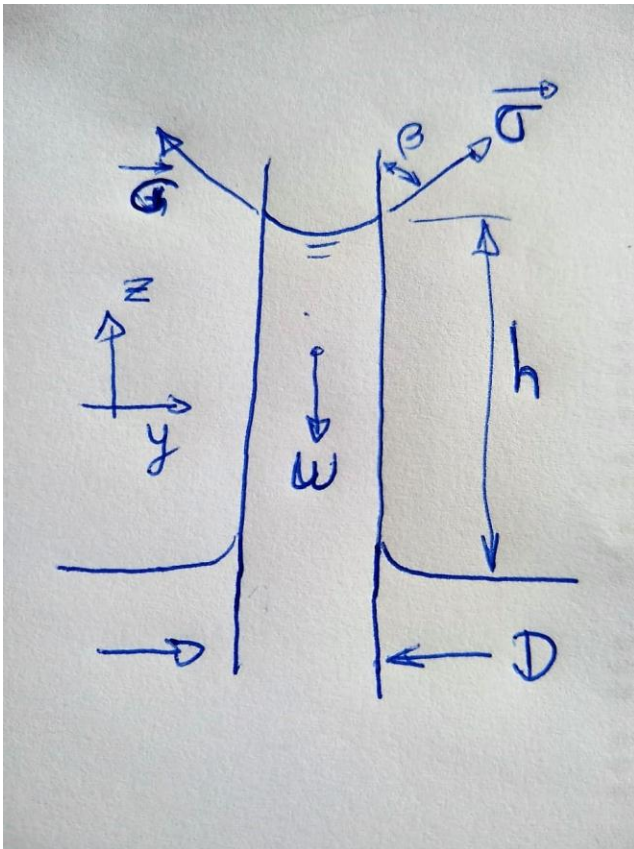
A ação de capilaridade é resultante de **forças coesivas no líquido** e de **forças adesivas entre o líquido e as paredes**.

Se as forças adesivas entre o líquido e as paredes de seu container excederem as forças coesivas entre as moléculas do líquido, o líquido irá subir as paredes do container.



Moléculas podem ser polarizadas (coesão molecular) e se comportam como “pequenos ímãs” (gotas caindo, gotas sobre um vidro)

Água sobe em vidro ou celulose por causa das fortes ligações de  $H_2$  entre água e o  $O_2$  no vidro,  $SiO_2$ . A atração entre as moléculas na parede do tubo e as do líquido é forte o suficiente para sobrepujar a atração (coesão) entre as moléculas do líquido e origina a tensão linear  $\sigma$ .



$\vec{\sigma}$  = vetor da tensão superficial ao longo do perímetro ( $\sigma = \frac{\text{força}}{\text{comprimento}}$ )

$$\vec{\sigma} = \sigma(\text{sen}\beta\vec{j} + \text{cos}\beta\vec{k})$$

No equilíbrio  $\sum F_z = 0$

$$\sigma\pi D\text{cos}\beta = W$$

$$\sigma\pi D\text{cos}\beta = \gamma \frac{\pi D^2 h}{4}$$

$$\therefore h = \frac{4\sigma\text{cos}\beta}{\gamma D}$$

Calcule elevação para tubo com 2 mm diâmetro para:

$$H_2O \text{ a } 20^\circ C, \sigma = 0,073 \text{ N/m e } \beta \approx 0^\circ, \rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$Hg \text{ a } 20^\circ C, \sigma = 0,47 \text{ N/m e } \beta \approx 130^\circ, \rho = 13600 \text{ kg/m}^3$$

Como  $h = \frac{4\sigma \cos\beta}{\gamma D}$ , resulta:

$$H_2O \rightarrow h = 1,5 \text{ cm}$$

$$Hg \rightarrow h = -0,44 \text{ cm}$$

Se for medir  $\Delta P$  muito pequeno o efeito da capilaridade vai introduzir grande erro na medição de pressão. Melhor usar capilar com 10 mm de diâmetro interno.

# Pressão de Vapor

## Pressão de Vapor ( $P_{vp}$ )

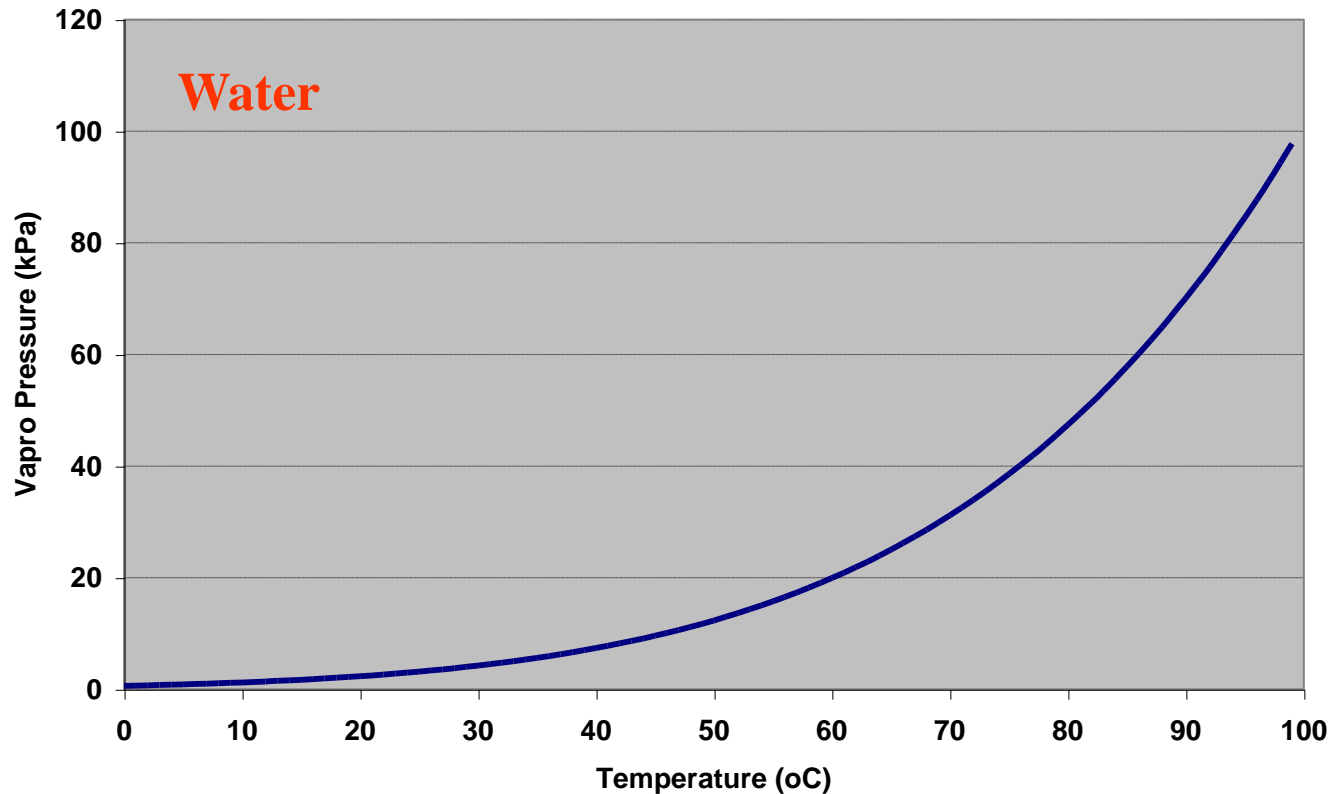
Pressão na qual um líquido entra em ebulição (evapora) a uma dada temperatura

- Função muito forte da temperatura (gráfico)
- Propriedade muito importante dos líquidos
- Quando a  $P_{vp}$  excede a pressão total aplicada na superfície, o líquido entra em ebulição (evapora).
  
- Por ex.: a 10 °C, a  $P_{vp}$  da água = 0.012 atm (1200 Pa)  
Se reduzir a pressão a este nível - água evapora
- Formação de bolhas de cavitação

**Perigo de cavitação em tubos, bombas, turbinas**

# Pressão de Vapor ( $P_{vp}$ )

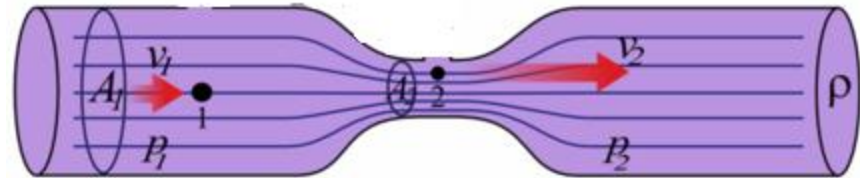
Vapor Press. vs. Temp.



Pressão de vapor de líquidos é função forte da temperatura.

- Em um escoamento, a pressão pode cair a um valor menor que a pressão mínima em que ocorre a vaporização do fluido ( $P_v$ ) na temperatura  $T_0$ . Então ocorrerá uma vaporização local do fluido, formando bolhas de vapor. A este fenômeno costuma-se dar o nome de cavitação (formação de cavidades dentro da massa líquida)

- $$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2$$



- Estas bolhas de vapor que se formaram no escoamento devido à baixa pressão, serão carregadas e podem chegar a uma região em que a pressão cresça novamente a um valor superior à  $P_v$ . Então ocorrerá a “implosão” dessas bolhas. Se a região de colapso das bolhas for próxima a uma superfície sólida, as ondas de choque geradas pelas implosões sucessivas das bolhas podem provocar trincas microscópicas no material, que com o tempo irão crescer e provocar o descolamento de material da superfície, originando uma cavidade de erosão localizada.





A palavra cavitação tem origem do latim “*cavus*” que significa buraco ou cavidade e é utilizada para descrever o processo de nucleação, crescimento e colapso das bolhas de vapor em um fluido.

A cavitação é um fenômeno físico pertinente somente à fase líquida das substâncias, provoca redução na eficiência do equipamento e está associada a três efeitos:

**geração de ruído, vibração e a erosão.**

Com a formação das bolhas de vapor há uma mudança nas características do escoamento, que pode tornar-se transiente. Esta mudança pode ocasionar oscilações no escoamento e vibrações na máquina que por consequência pode afetar o rendimento do sistema hidráulico. Também, com o colapso das bolhas ocorre um micro-jato d'água sobre a superfície e a formação de ondas de choque, ocasionando desgaste por erosão

Apesar dos diversos estudos realizados, os mecanismos de formação da erosão por cavitação não estão completamente esclarecidos. Considera-se, até o presente momento, que a erosão por cavitação é provocada por dois mecanismos de formação: **ondas de choque e micro-jatos** (Koivula, 2000). Quando o colapso da bolha ocorre de forma simétrica, longe das superfícies sólidas, tem-se o mecanismo de ondas de choque que é a emissão de energia de forma quase instantânea, proveniente do colapso das bolhas de vapor de forma simétrica. O mecanismo de micro-jatos ocorre quando há uma assimetria no colapso das bolhas, devido à proximidade com uma superfície sólida.

As ondas de choque (colapso simétrico), são consequência do colapso violento de milhares de bolhas de vapor que podem gerar ondas de choque de até 1000 MPa (Gadag e Srinivasan, 1995). Este valor excede a tensão limite de escoamento de vários materiais metálicos e quando estas ondas de choque são direcionadas para uma determinada região onde há uma superfície sólida, tem-se a erosão por cavitação. A figura 1.2 representa o colapso simétrico de uma bolha de vapor, pode-se observar que há uma propagação de energia em todas as direções.

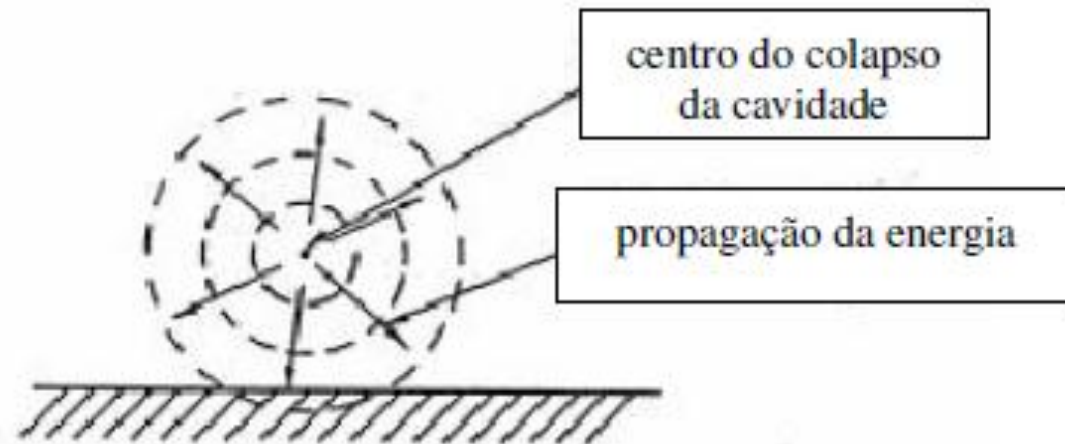


Figura 1.2. Desenvolvimento da onda de choque (Koivula, 2000).

Quando o colapso das bolhas é muito próximo de uma superfície sólida, ocorre uma condição de assimetria no colapso destas bolhas. Esta assimetria é provocada pela diferença na taxa de aceleração para dentro da bolha, ou seja, de um lado da bolha a aceleração é maior para o interior devido à perturbação ocasionada pela superfície sólida, fazendo com que se forme um micro-jato de alta velocidade que incidirá na superfície, como pode ser visto na figura 1.3

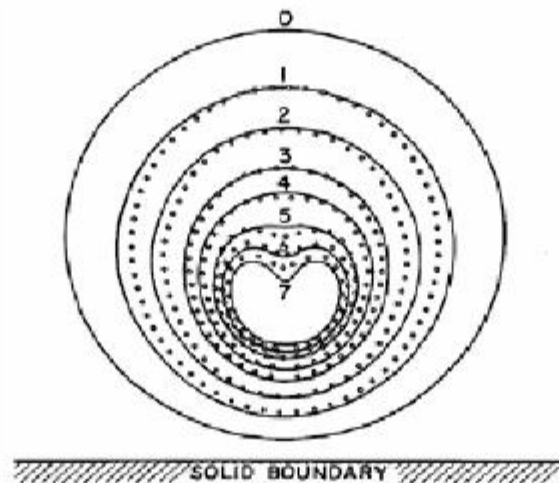
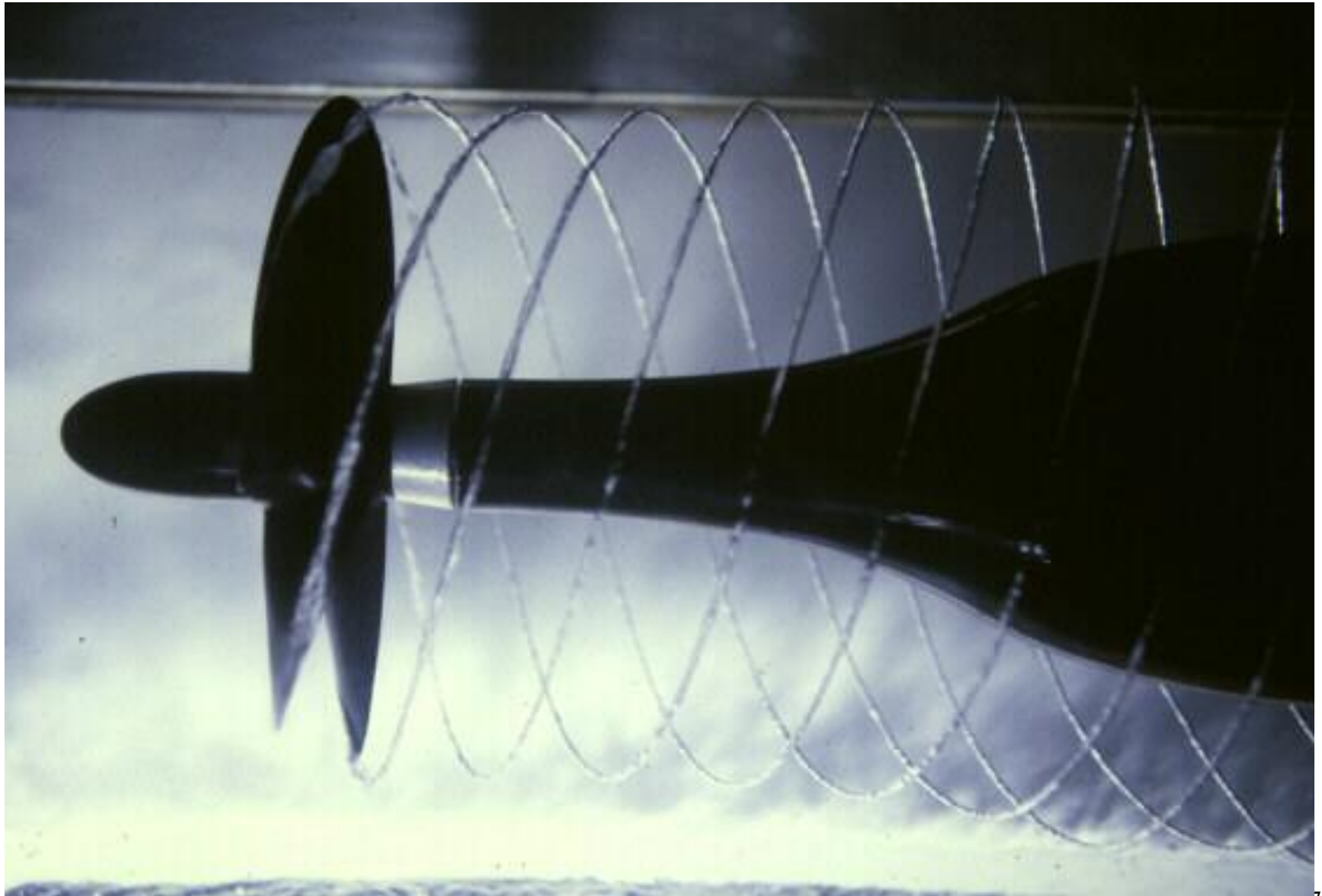


Figura 1.3. Desenvolvimento do colapso e do micro-jato (Brennen, 1995).





Ebulição -o ponto de ebulição de um líquido é a temperatura na qual a pressão de vapor do líquido é igual à pressão atmosférica

local	Elevação (m acima do nível do mar)	Ponto de ebulição da água(°C)
Santos	Nível do mar	100,0
Campos do Jordão	1320	95,6
Denver	1600	95,0
La Paz	3800	91,4
Everest	8840	~71



# Compressibilidade

# Compressibilidade

- Compressibilidade é a mudança em volume devido a uma mudança em pressão
- Uma boa medida da compressibilidade é o módulo de elasticidade volumétrico (inversamente proporcional à compressibilidade)

$$E_v = -v \frac{dp}{dv} \quad v = \frac{1}{\rho} \quad (\text{specific volume})$$

*p is pressure*

# módulo de elasticidade volumétrico

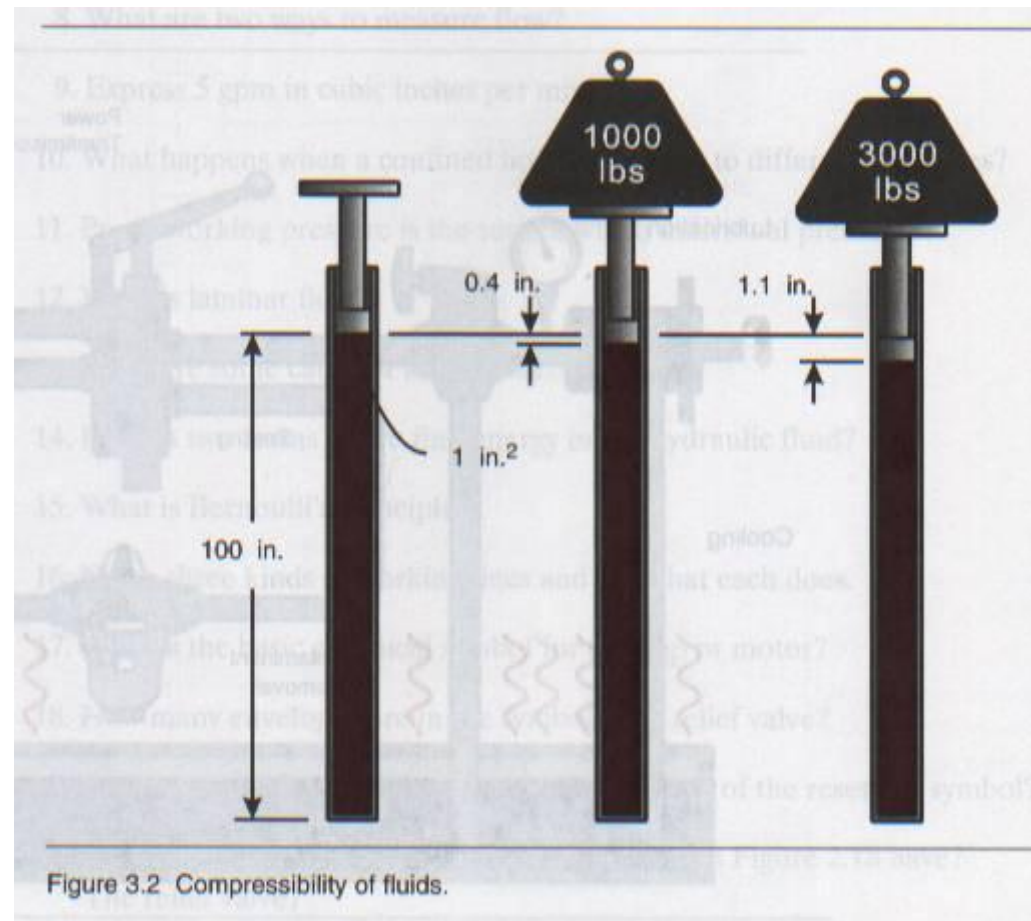
- Da definição

$$E_v = -v \frac{dp}{dv} \quad \longrightarrow \quad \frac{(v_{final} - v_{initial})}{v_{initial}} \approx - \frac{(p_{final} - p_{initial})}{E_v}$$

- Para água a 1 atm e 20 °C  $E_v = 22800$  atm
- Da expressão acima, aumentando a pressão 70 atm, a água irá comprimir só 1/320 (0.3%), de seu volume inicial
- Assim, a água pode ser tratada como **incompressível**  
( $\rho$ ) constante

# Compressibilidade

- Derivados de petróleo são pouquíssimo compressíveis:
  - 0.4% a 70 atm e até
  - 1.1% at 200 atm



# Leis dos gases

# Leis dos Gases

**Lei de Boyle**  $P \propto \frac{1}{V}$  (at constant  $T$  and  $n$ )

**Lei de Charles**  $V \propto T$  (at constant  $P$  and  $n$ )

**Lei de Avogadro**  $V \propto n$  (at constant  $P$  and  $T$ )

$$PV \propto nT$$

**Lei dos Gases Perfeitos**  $PV = nRT$

# Lei dos Gases Perfeitos

$$PV = nRT$$

Unidade de P: Pascal

Unidades de V:  $m^3$

Unidade de T: kelvin

Unidade de  $R = 8,309 \text{ Pa} \cdot m^3 / \text{mol} \cdot K$

Zepelin ~ 90 m compr. e 30m  $\emptyset$ . Estime peso do gás a 20°C para a) He a 1,1 atm e b) ar a 1,0 atm. O que representa a diferença entre estes valores?

$$V = 2\pi Lr^2 = 42.412m^3$$

Estimativa para os  $\rho$ , considerando gás ideal:

$$\rho_{He} = \frac{P_{He}}{R_{He}T} = \frac{1,1(101350)}{2077.293} = 0,1832 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{ar} = \frac{P_{ar}}{R_{ar}T} = \frac{1,0(101350)}{287.293} = 1,205 \text{ kg/m}^3$$

E os pesos específicos seriam:

$$W_{He} = \rho_{He} \cdot g \cdot V = 76.000 \text{ N}$$

$$W_{ar} = \rho_{ar} \cdot g \cdot V = 501.000 \text{ N}$$

A diferença, 425.000 N, é o empuxo, a força de sustentação do Zepelin.