

# **Mecânica dos fluidos**

***PME3222***

***Engenharia Civil***

***Marcos Tadeu Pereira***

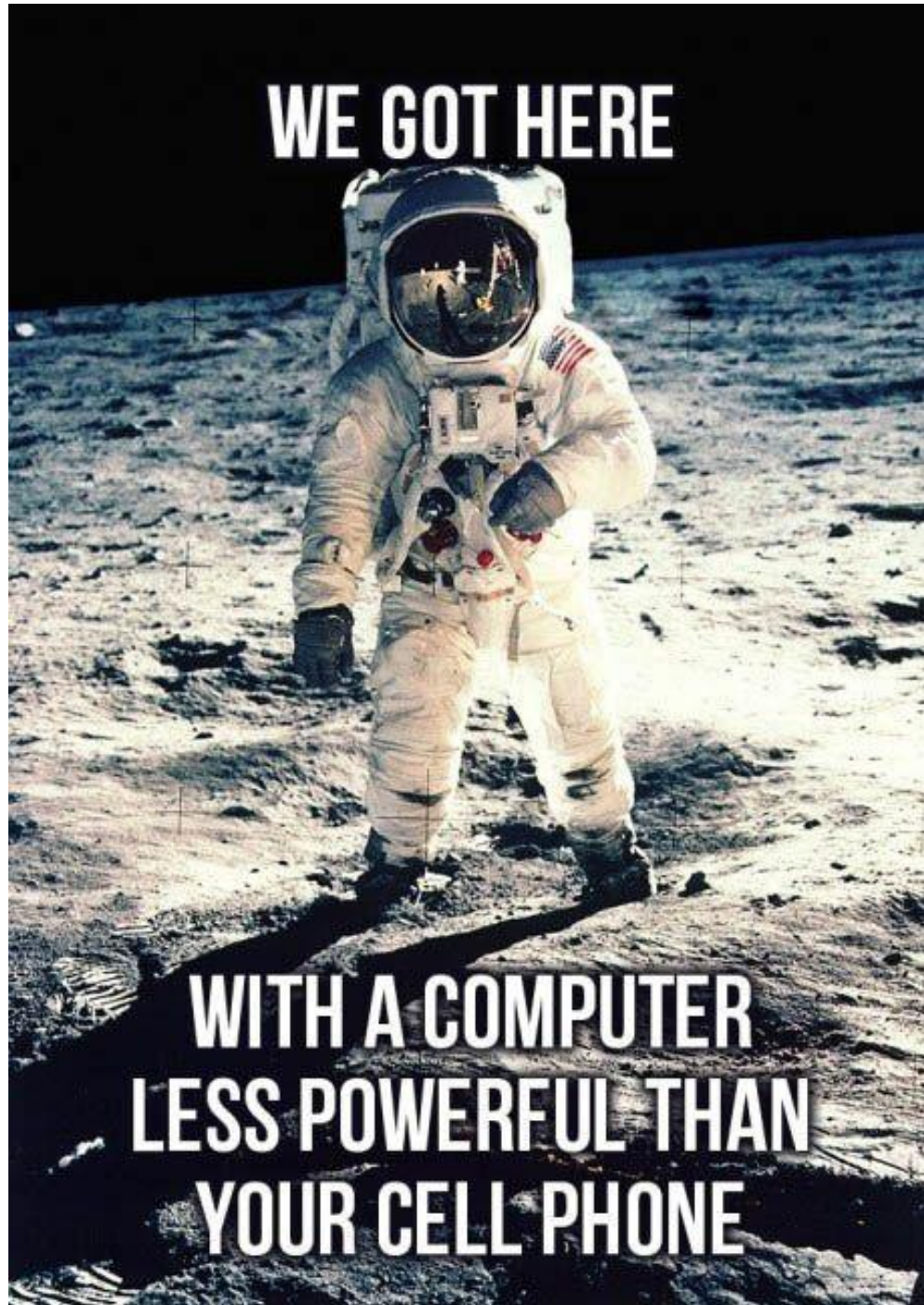






**WE GOT HERE**

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



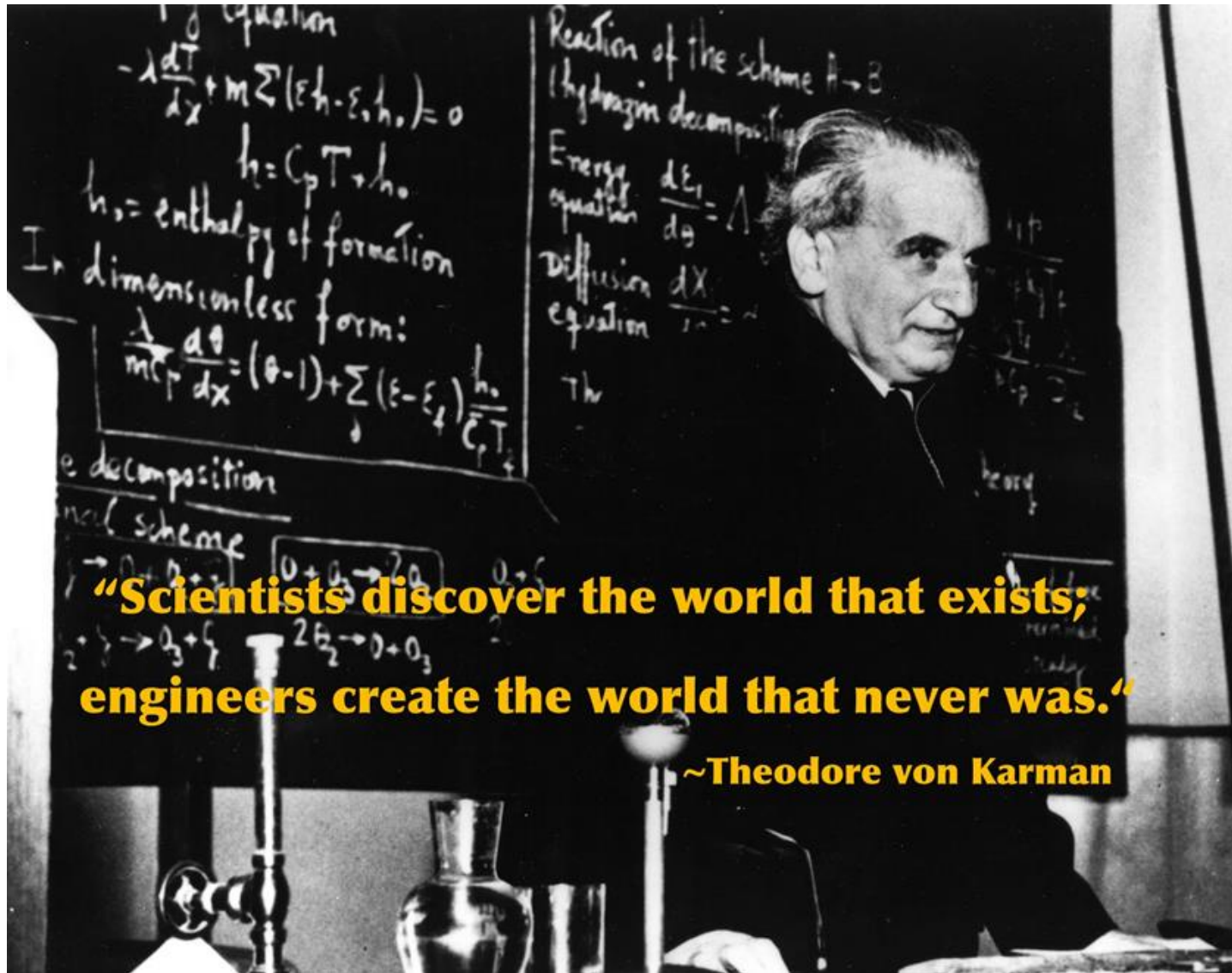
# And a rocket! A fucking huge rocket!

111m altura  
10m diâmetro  
2.970 toneladas





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



# BÁSICO EM MECÂNICA DOS FLUIDOS

**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

- Transporte -
  - Água
  - Esgoto
  - Petróleo
  - Gás Natural
  - Derivados Petróleo
  - Sucos
  - Álcool
  - Ar comprimido
  - Vapor
  - Ar condicionado
- Ventos, tornados e furacões
- Trânsito
- Galáxias

# 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

- Instalações industriais (quase todas)
- Água-      Captação, reservação  
                 Tratamento  
                 Distribuição  
                 Rios, represas, oceanos
- Efluentes– industriais e urbanos
- Enchentes
- Emissões e efluentes gasosos
- 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

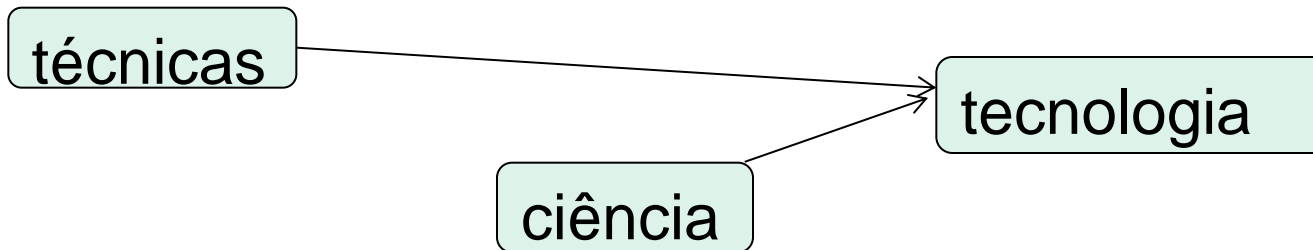
**Conclusão: rendam-se.**

**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

# Grandes problemas

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





Download from  
**Dreamstime.com**

This watermarked comp image is for previewing purposes only.



ID 36504223

© Piotr Cieszyński | Dreamstime.com











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**





em **200 anos**, nós **teremos**  
liberado na **atmosfera** o  
carbono que a **natureza** levou  
**600 milhões de anos** para  
armazenar (**trap**)





**O nível do mar aumentou de 15 a 20  
cm no séc 20 e irá aumentar outros  
18 a 59 cm até o ano 2100**



Mudança climática já contribui para a morte de 400 mil pessoas/ ano

Custo: US\$1,2 trilhões/ano, 1,6% do produto global bruto.

Poluição uso de fósseis contribui para a morte de pelo menos 4,5 milhões de pessoas/ano

Até 2030 custo combinado de mudança climática e poluição do ar ~ 3,2% do PNB global  
com países menos desenvolvidos sofrendo perdas de até 11%

Eventos extremos –inundações, secas, tempestades ~ 2% do PNB dos EUA em 2030.







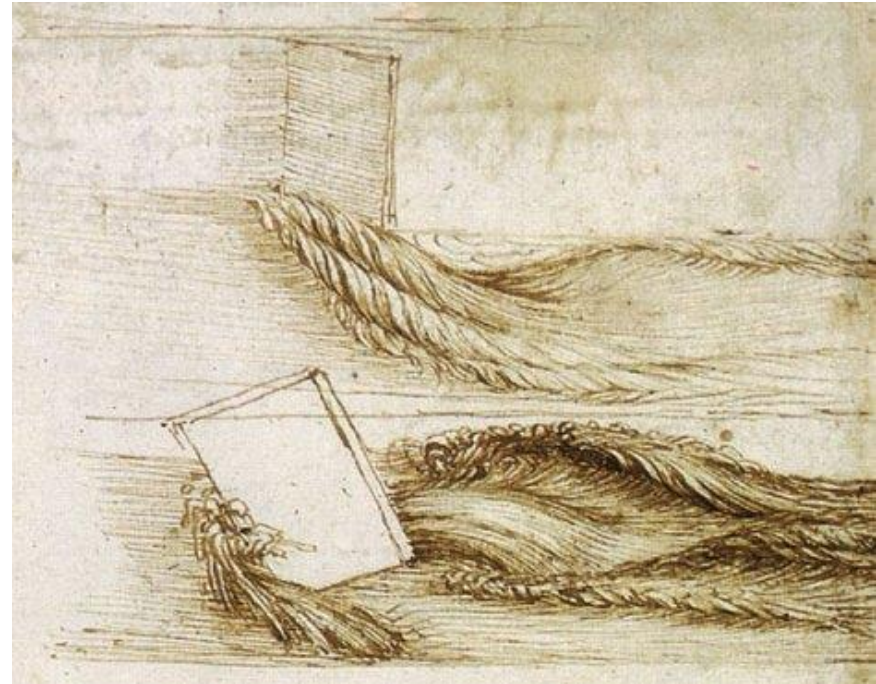






# Leonardo da Vinci - (1452-1519)

- 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.)





# Leonardo da Vinci "A Gigantic Explosion"























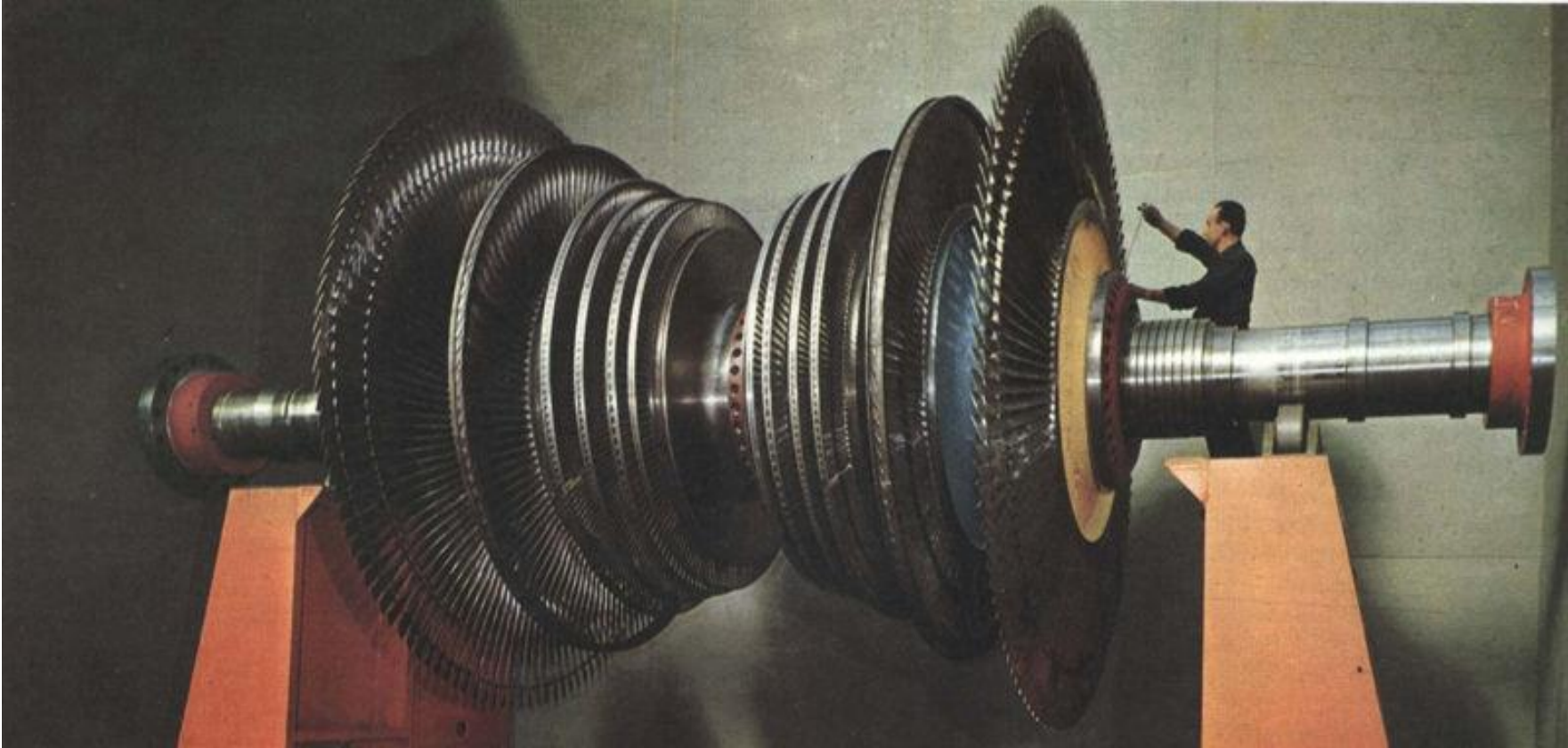


















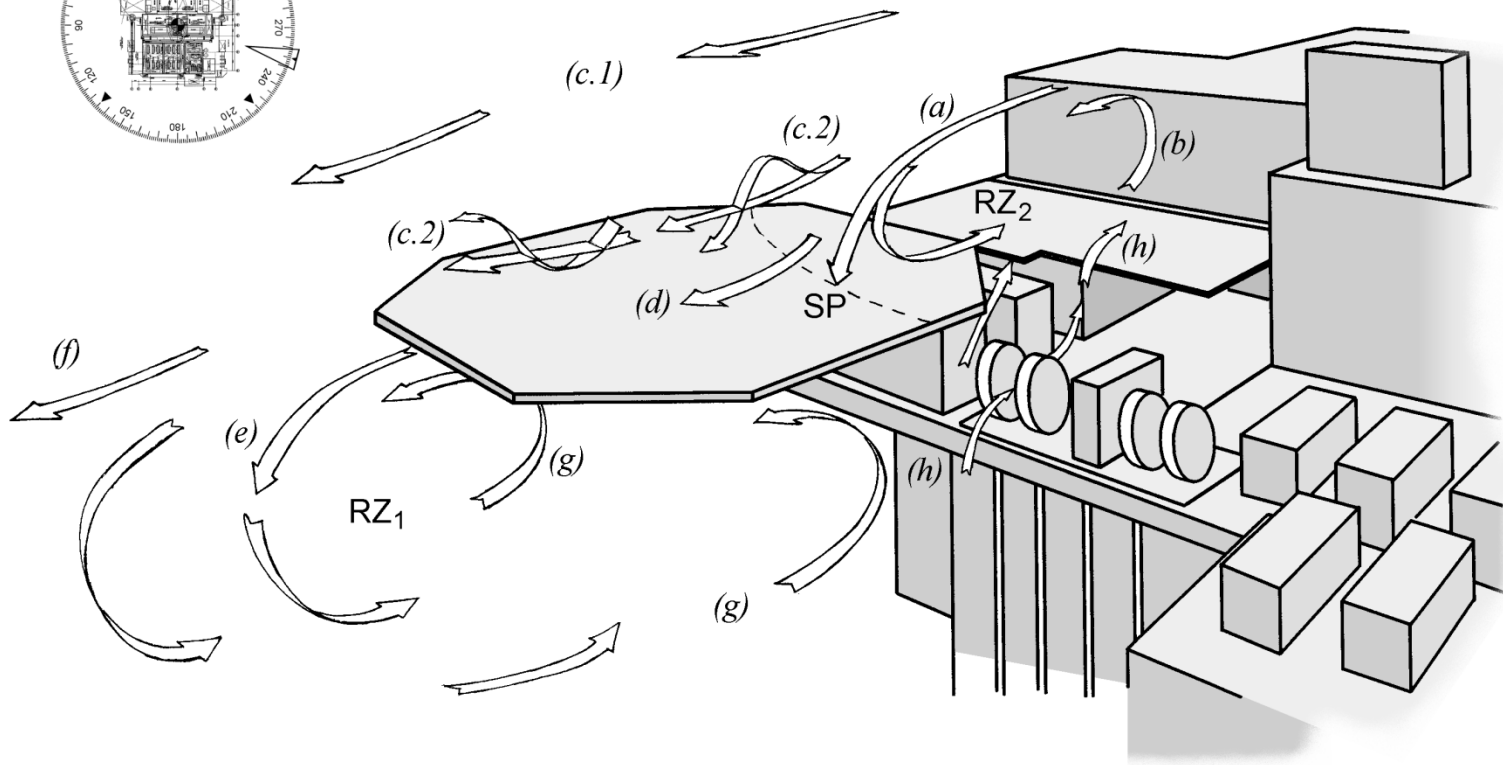
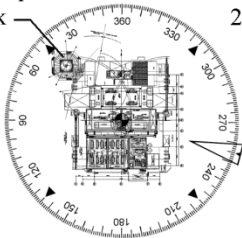




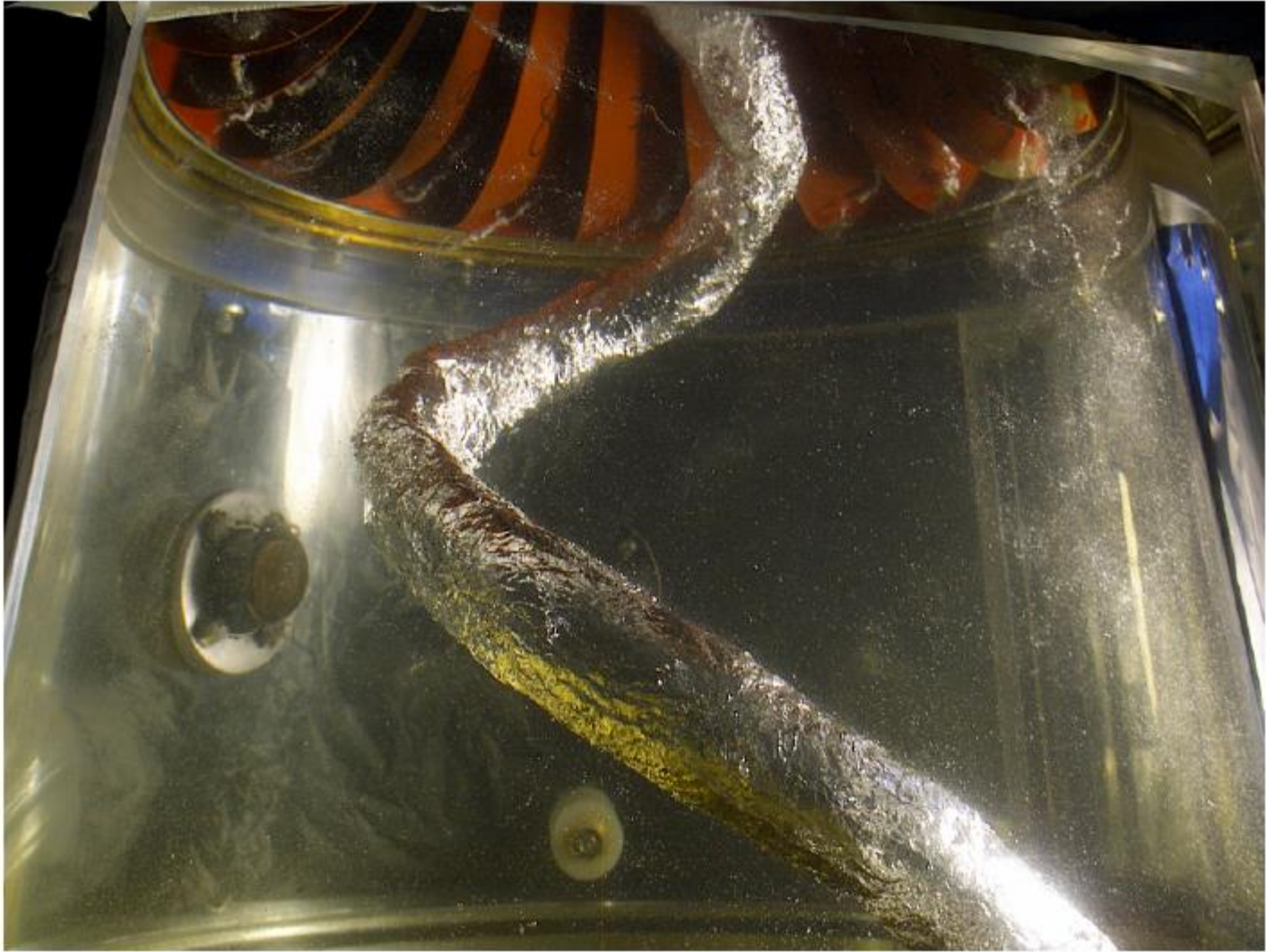




Helicopter Deck  
Wind Direction: 255deg







## DAS CHEIAS ÀS INUNDAÇÕES

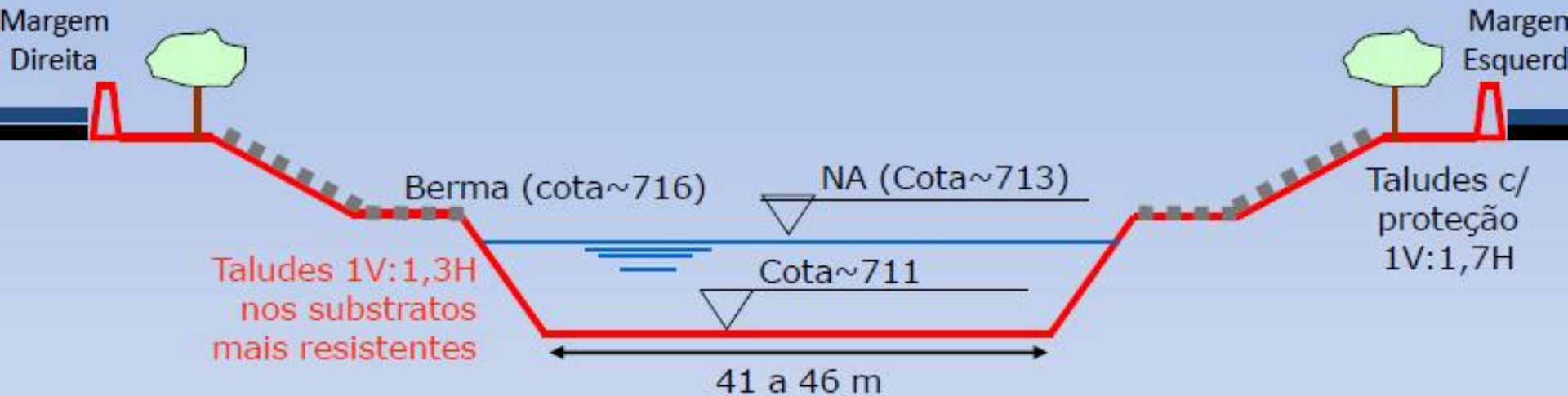
Em meados do século XIX, surgem os primeiros registros da transformação das cheias do rio em inundações.



Detalhe da capa da revista *O Cabrião*, de 24 de fevereiro de 1867. A charge apresenta os personagens Pipelet e Cabrião num barco em meio à rua Imperador, situado nas proximidades da baixada do rio Tamanduateí, próximo à Praça da Sé.



## PROJETO - CONFIGURAÇÃO ATUAL DO CANAL



- Cota média do fundo do canal na cota 711 m
- Rebaixamento de 2,5 m a 3,0 m ao longo de toda a calha
- Nível d'água operacional médio na cota 713 m em 95% do tempo
- Viabilidade de navegação

# Rio Pinheiros





# Rio Pinheiros



## Situação do Sistema em 26/01/2010

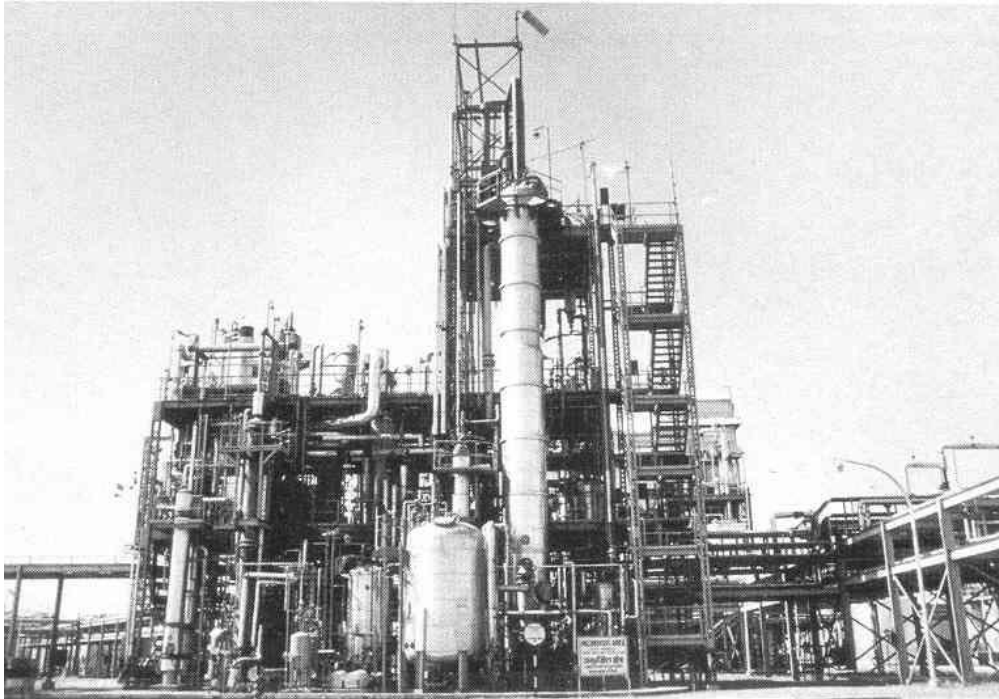




# Desastre de Bhopal 3/12/84

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

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

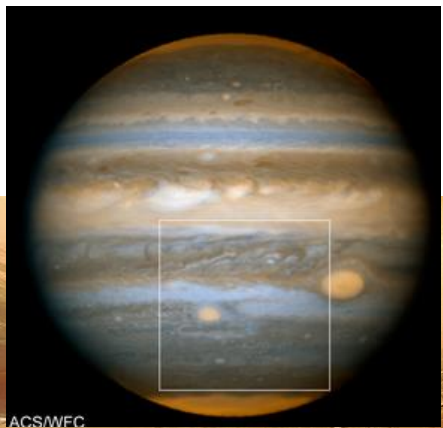
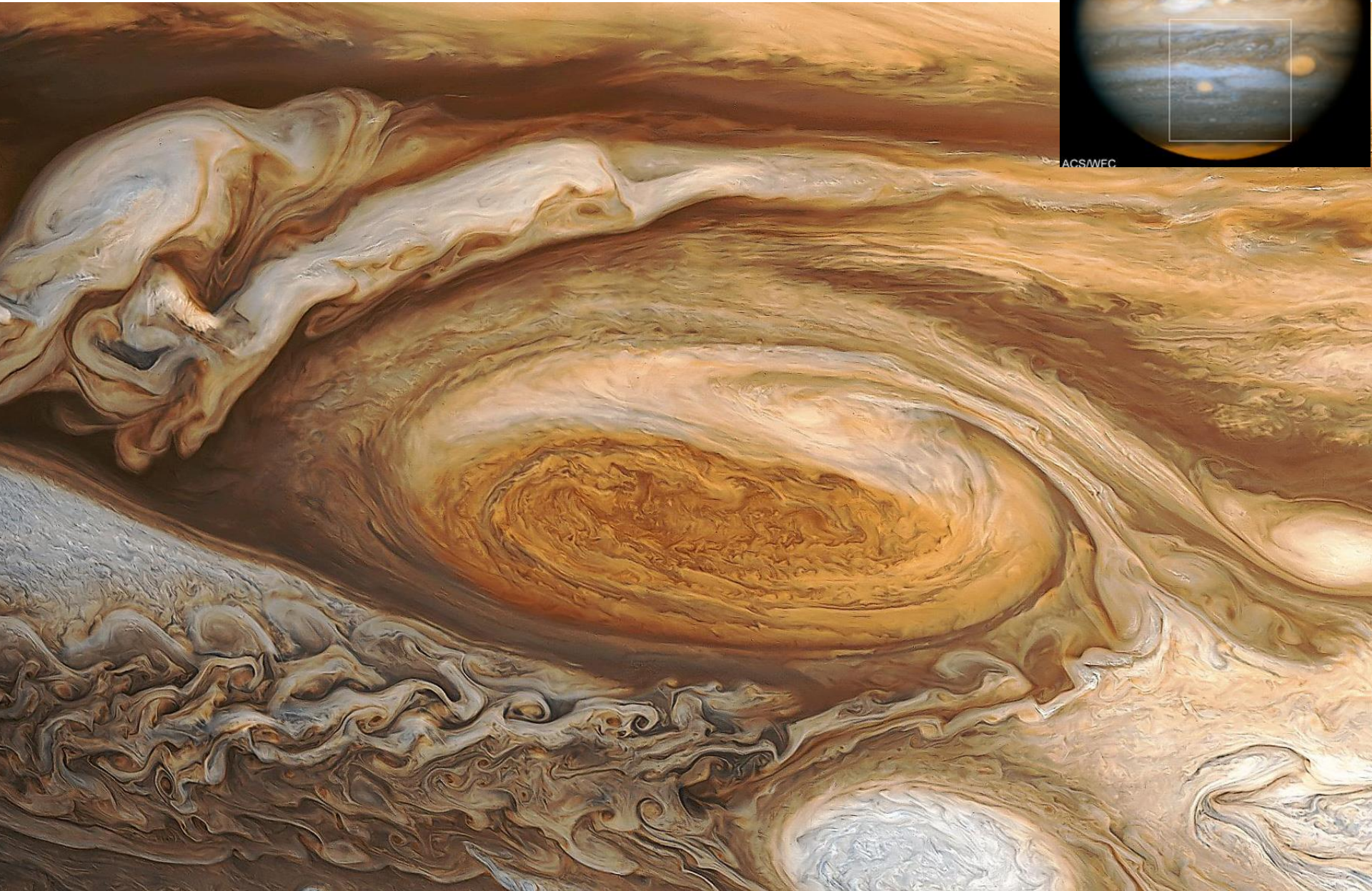


**Pagaram US\$ 0,43 a cada envolvido**







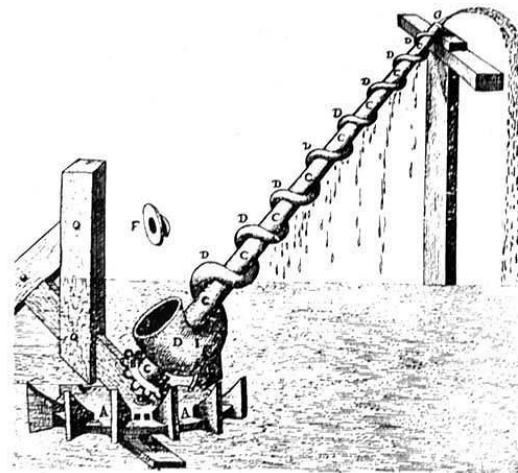
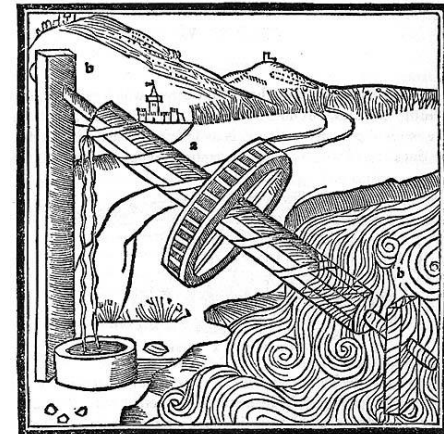
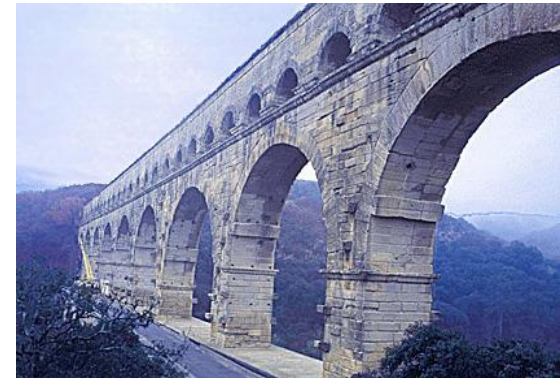


ACS/WEC

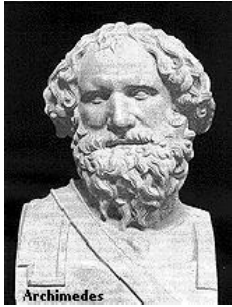


# Antiguidade

- 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. Inventou o parafuso dágua.



# Nomes da Mecânica dos Fluidos



Archimedes  
(C. 287-212 BC)



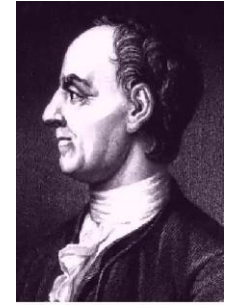
Newton  
(1642-1727)



Leibniz  
(1646-1716)



Bernoulli  
(1667-1748)



Euler  
(1707-1783)



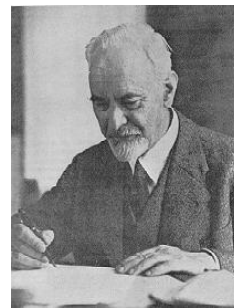
Navier  
(1785-1836)



Stokes  
(1819-1903)



Reynolds  
(1842-1912)



Prandtl  
(1875-1953)



Taylor  
(1886-1975)



Kolmogorov  
(1903-1987)



# Diferenças entre sólido e fluidos

# Conceito de fluidos – corpos materiais

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

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

O modelo do **continuum** nos permite não ter que tratar com interações moleculares diretamente. Estas interações serão tratadas implicitamente, de forma macroscópica, como propriedades de funções físicas (**viscosidade**, massa específica, etc).por exemplo

# O Continuum

Uma boa maneira de determinar se o modelo do continuum é aceitável é comparar um comprimento característico  $d$  da região do escoamento com o caminho livre médio  $\lambda$  das moléculas

- Se  $d \gg \lambda$  o modelo do continuum é válido
- Gases  $\rightarrow \lambda \sim 10^{-7}$  m
- Líquidos, água, por exemplo  $\rightarrow \lambda \sim 10^{-9}$  m
- Número de Knudsen  $Kn = \lambda/d \gg 1$
- O livre caminho médio ( $\lambda$ ) é a distância média que uma molécula percorre antes de colidir com outra molécula.



- **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

# **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

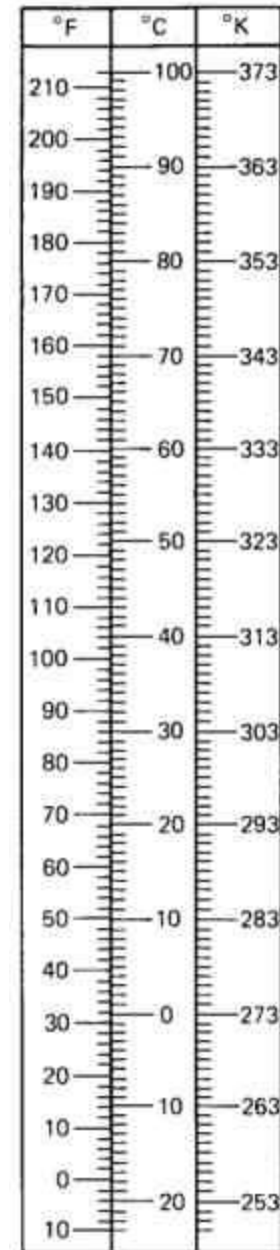
Hg à 32°F



# Escala de temperatura

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

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

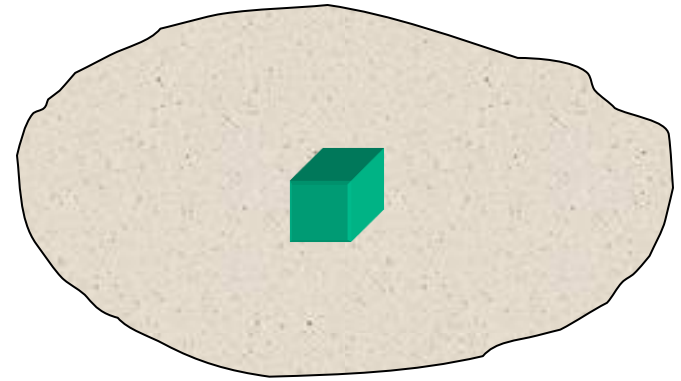


# Massa específica

## 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 $U = 1/\rho$

**Densidade D** é a 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



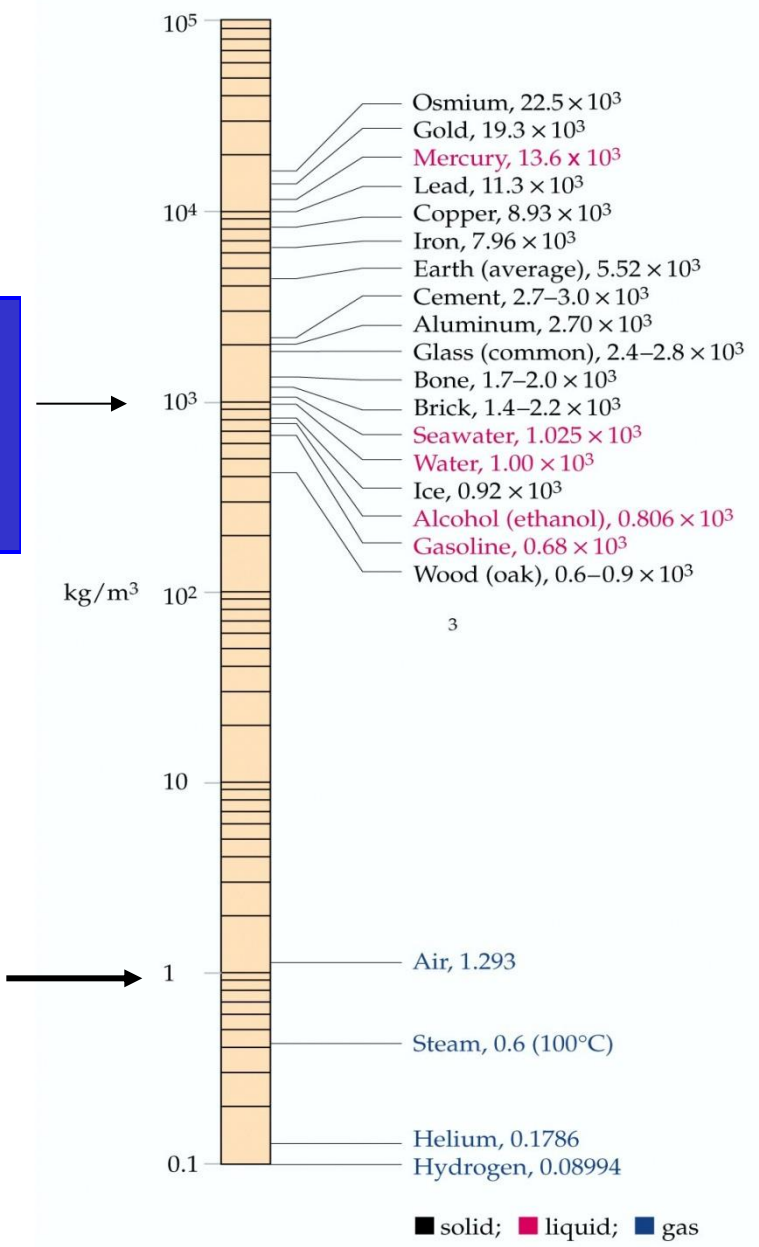
# Massa específica

**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

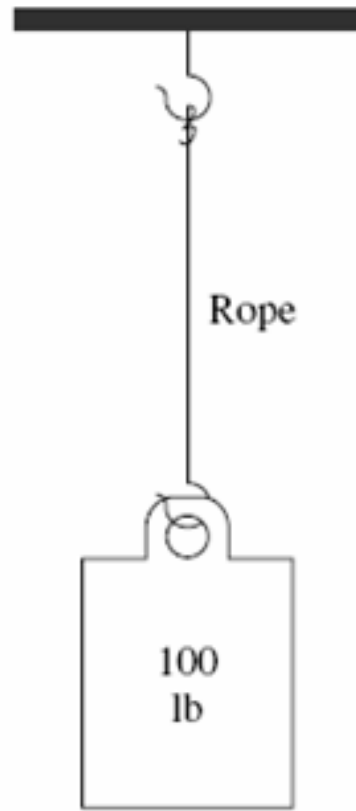
# Tensões: Forças normalizadas por área

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

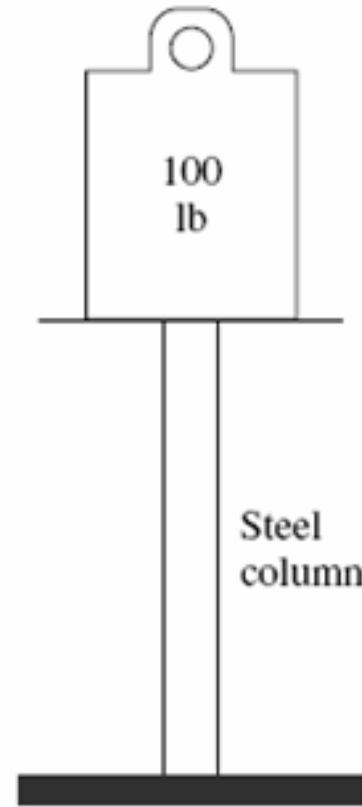
Unidades:

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

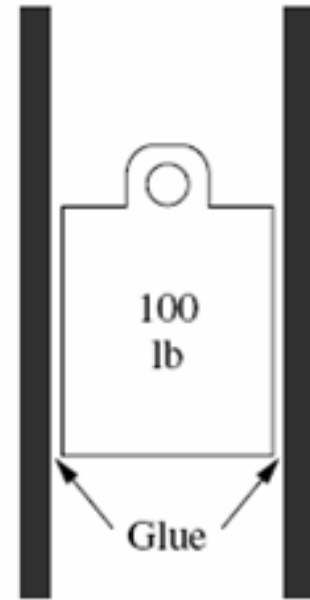
$$1 \text{ psi} = 1 \text{ lbf/in}^2$$



(a)



(b)



(c)



# Viscosidade

# Viscosidade

- Viscosidade: resistência encontrada quando se move uma camada de líquido contra outra. “Equivale” ao atrito na mecânica dos sólidos
- $\mu$  Coeficiente de viscosidade = viscosidade dinâmica = viscosidade absoluta = simplesmente a **viscosidade** do fluido.
- Lei de Newton da viscosidade

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

$$[\mu] = (\text{N}\cdot\text{s})/\text{m}^2 \text{ or } \text{Pa}\cdot\text{s}$$

# **A viscosidade é importante para**

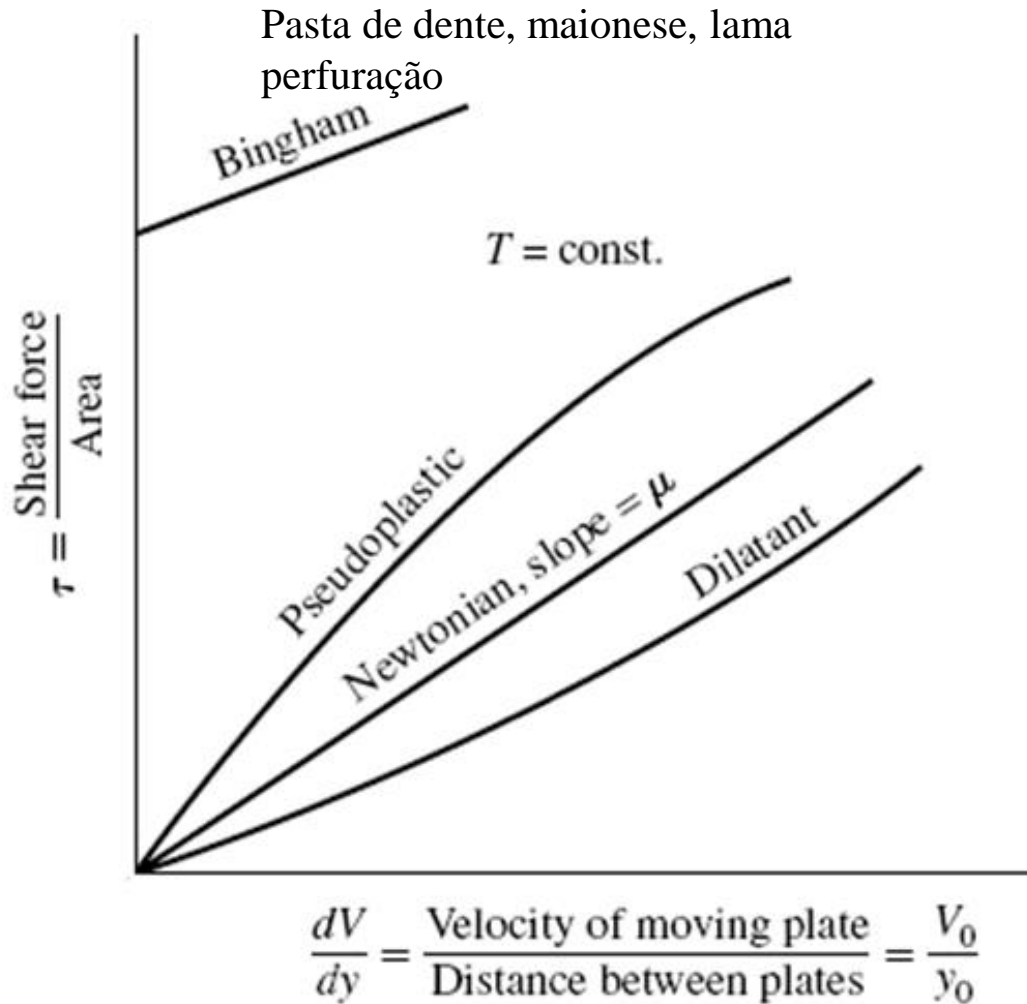
- determinar o volume de fluidos que pode ser transportado em um pipeline em um determinado período de tempo**
- determinar perdas de energia associadas com o transporte de fluidos em dutos, canais e sistemas hidráulicos**
- Princípio da aderência completa - por causa de viscosidade, nas fronteiras (paredes), 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

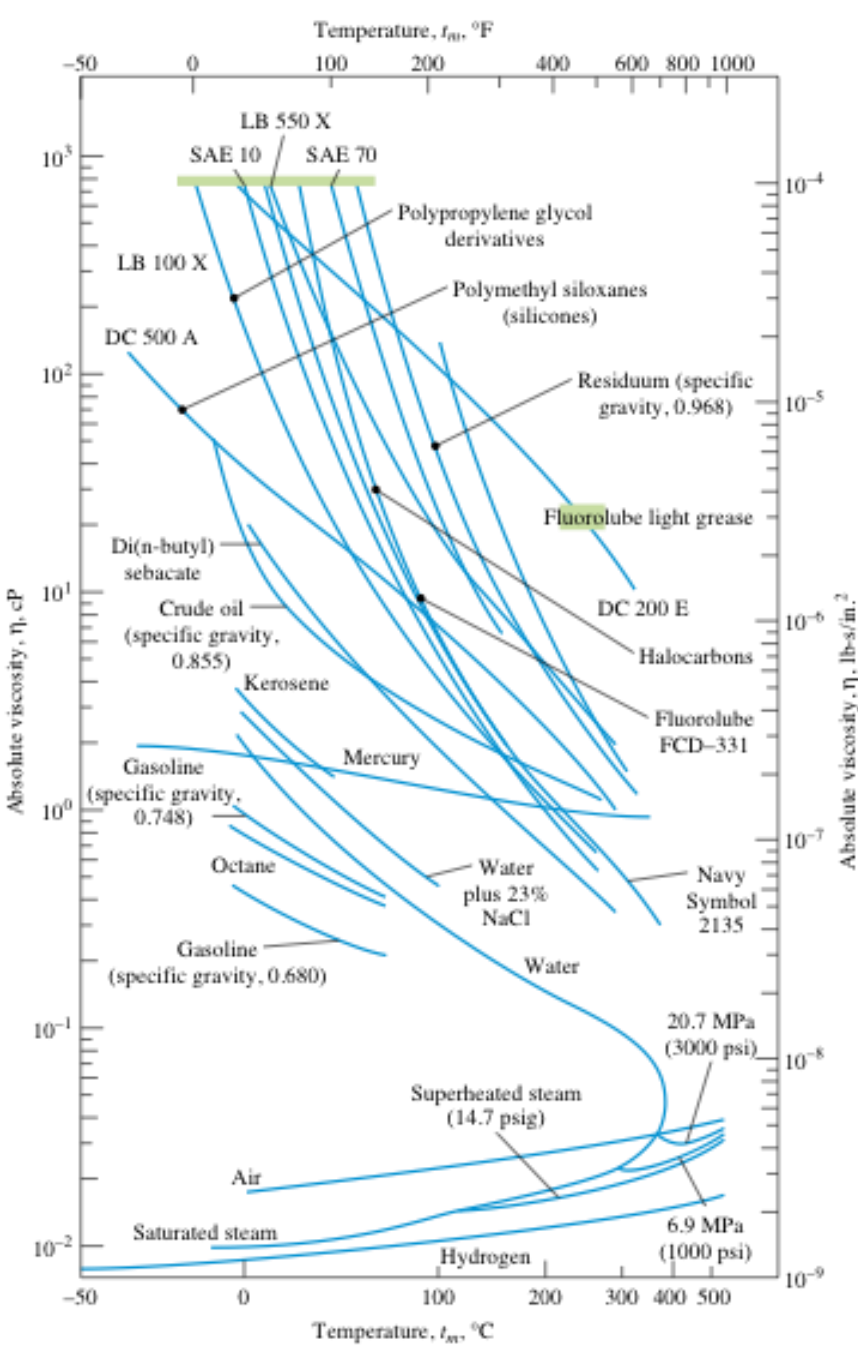


$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Fluidos newtonianos}$$

**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.

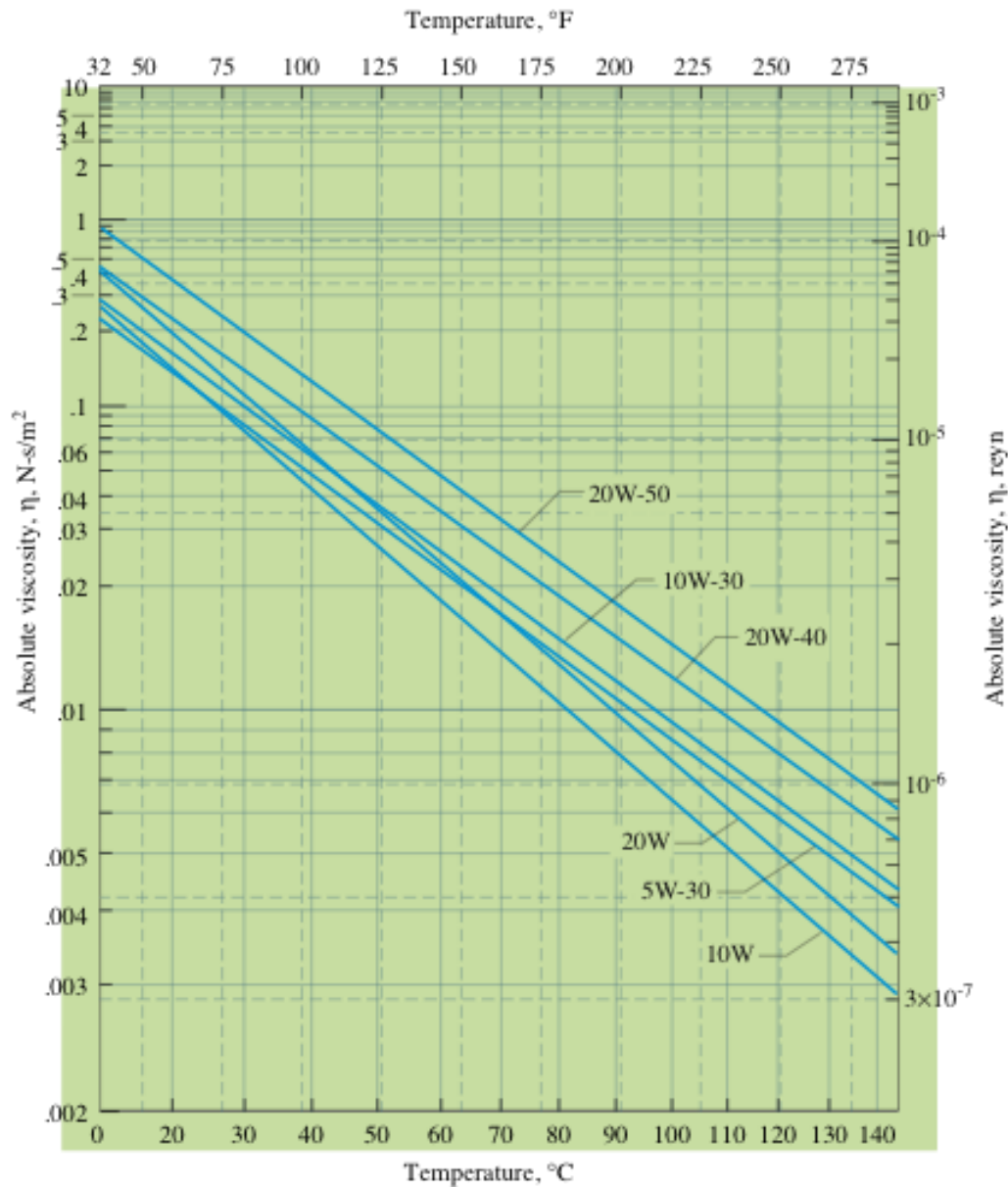
**Dilatante:** ex. maizena + água (suspensões coloidais e floculação)

Taxa de cisalhamento



Dados de Viscosidade absoluta para diversos fluidos e temperaturas





# Viscosidade de óleos SAE Multigrade à pressão atmosférica

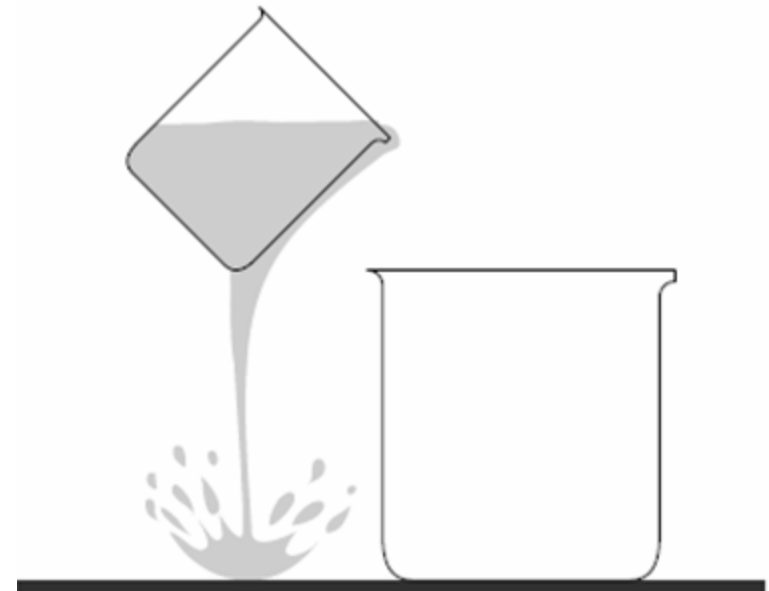
**EXERCICIOS**

# Tensão superficial

# TENSÃO SUPERFICIAL







A tensão superficial é o resultado das moléculas na superfície de um líquido serem atraídas para dentro pelas moléculas das superfícies internas.

Este efeito tende a dar uma forma esférica à interface.

# Capilaridade

**A atividade de 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.

# Pressão de Vapor

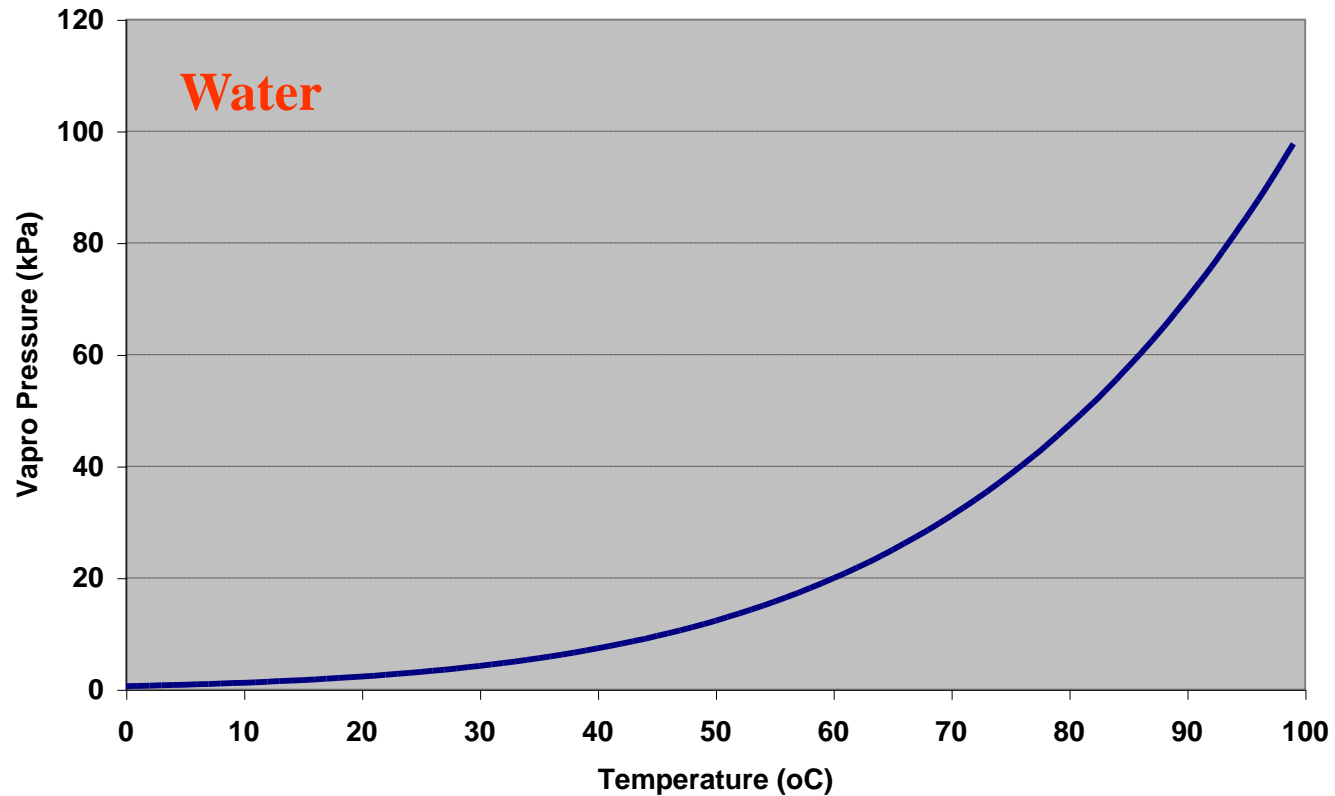


# Pressão de Vapor ( $P_{vp}$ )

- Pressão na qual um líquido entra em ebulição a uma dada temperatura
- Função muito forte da temperatura (gráfico)
- Propriedade muito importante dos líquidos
- Quando a  $P_{vp}$  excede a pressão total do ar aplicada na superfície, o líquido entra em ebulição.
  
- A 10 °C, pressão de vapor da água = 0.012 atm = 1200 Pa
- Se reduzir a pressão a este nível, - água entra em ebulição
- Formação de bolhas de cavitação
- Perigo de cavitação em tubos, bombas, turbinas, propellers

# Pressão de Vapor ( $P_{vp}$ )

Vapor Press. vs. Temp.



Pressão de vapor de líquidos é função forte da temperatura.

# Pressão de Vapor de Líquidos

Todos os líquidos tendem a evaporar, quando colocados em um recipiente fechado.

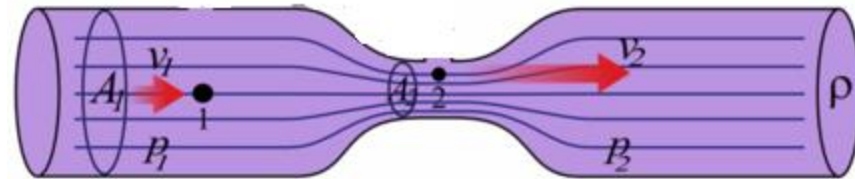
A evaporação termina quando o equilíbrio é alcançado entre o líquido e os estados gasosos da substância no container:

$n^\circ$  de moléculas escapando da superfície do líquido =  $n^\circ$  de moléculas entrando



- 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.

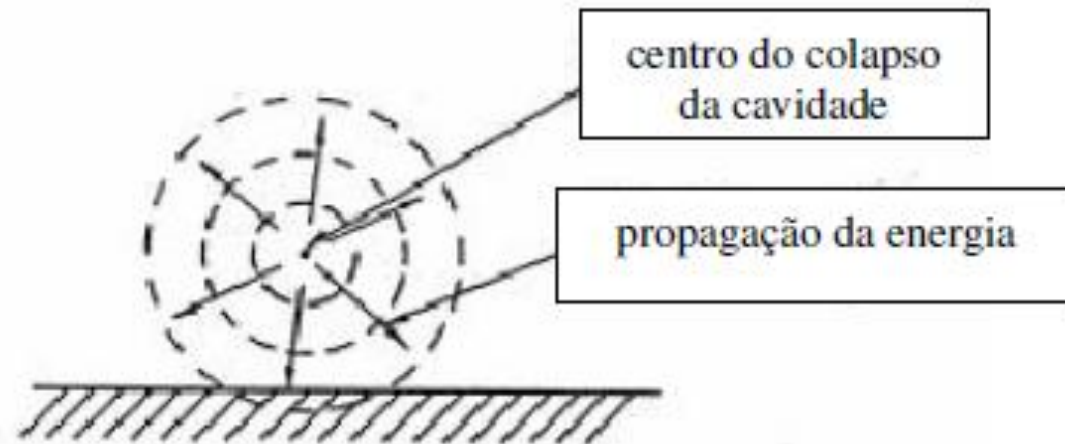


Figura 1.2. Desenvolvimento da onda de choque (Koivula, 2000).

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

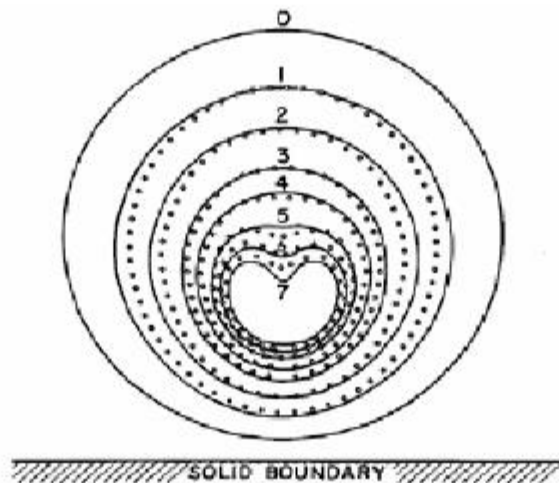
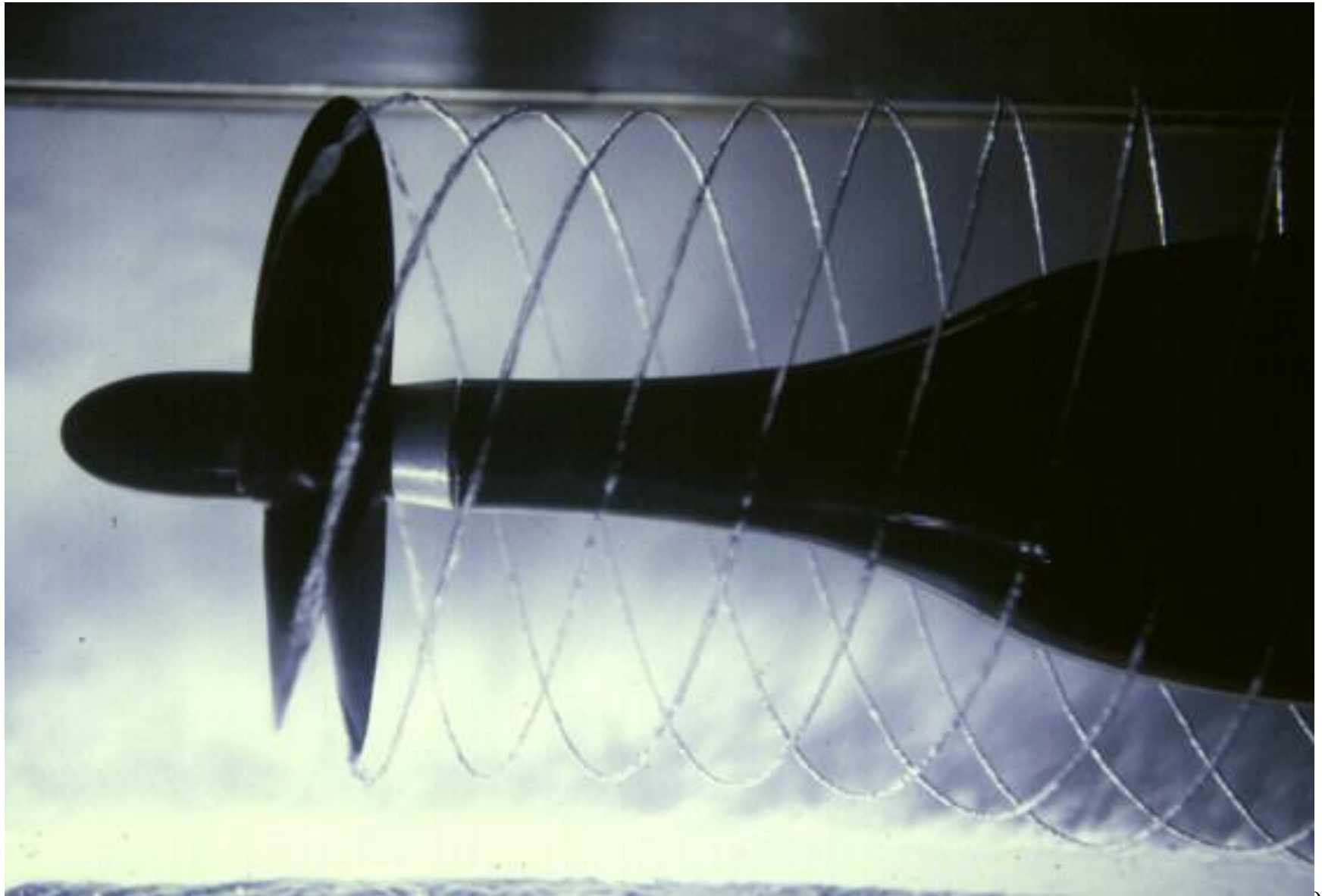


Figura 1.3. Desenvolvimento do colapso e do micro-jato (Brennen, 1995).







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)

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

*p is pressure*

# módulo de elasticidade volumétrico

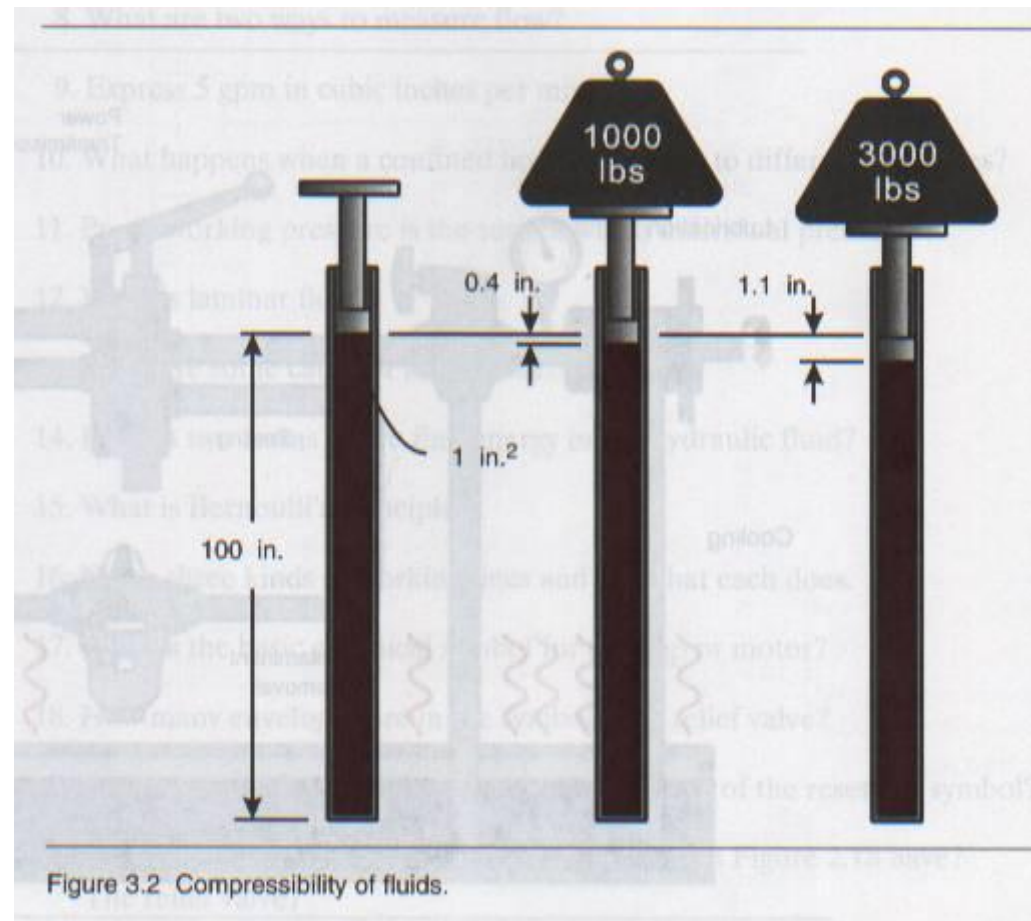
- Da definição

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

- 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 Avogadros**  $V \propto n$  (*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  $R = 8,309 \text{ Pa} \cdot m^3 / \text{mol} \cdot K$