

Máquinas de fluxo



EPUSP / Engenharia Mecânica



Humberto Gissoni

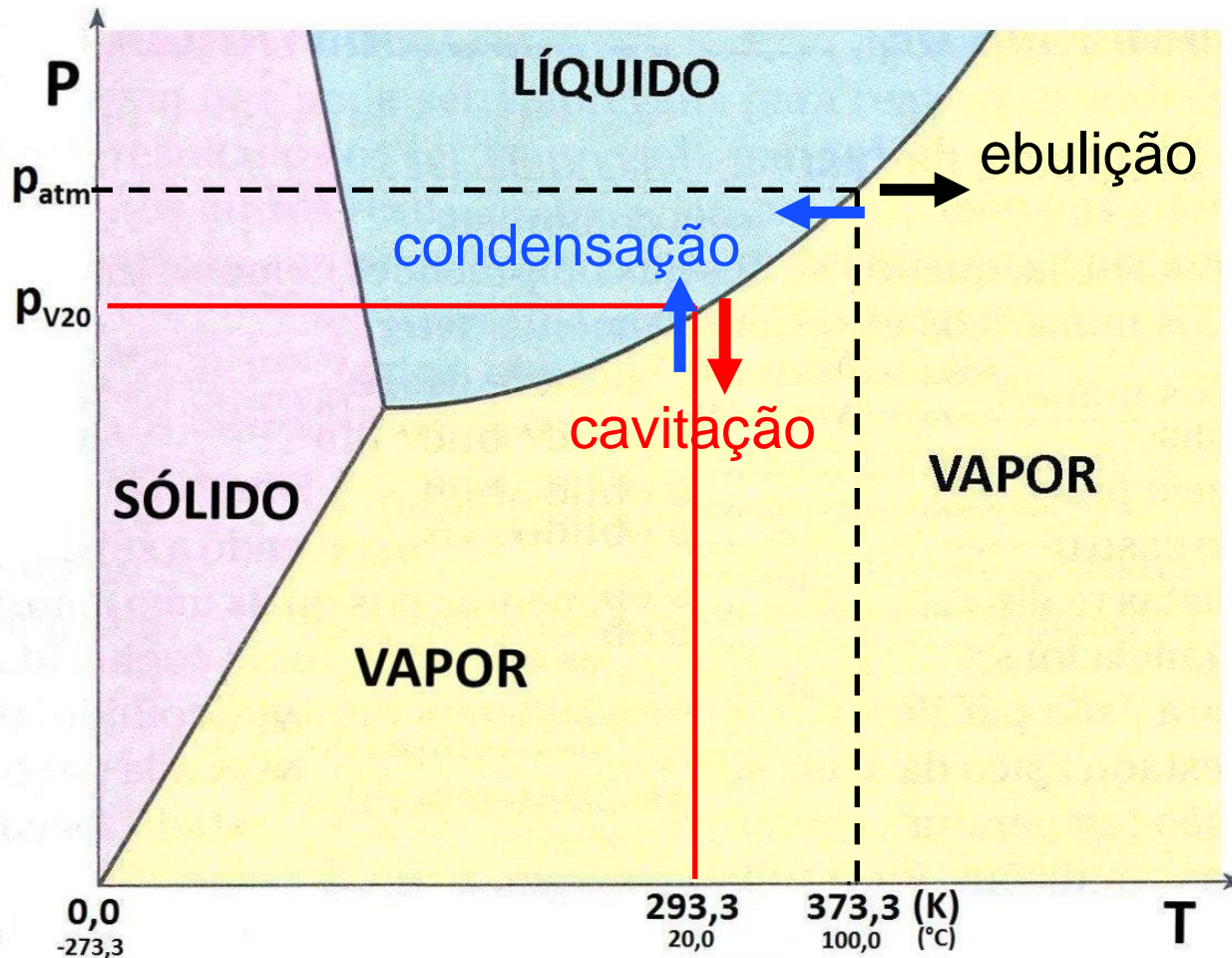


1. Energia
2. Máquinas de transformação de energia
- 3. Cavitação**
 - Introdução
 - Conceituação
 - Ocorrência de cavitação
 - Parâmetros de cavitação
4. Instalações hidrelétricas
5. Instalações termelétricas
6. Sistemas de recalque



- Cavitação: formação de fase de vapor em **meio líquido** em regiões submetidas a pressões reduzidas.
 - Fenômeno restrito a **líquidos**
 - Específico de regiões de baixa pressão em escoamentos
 - Normalmente relacionado a velocidades elevadas de escoamento
- Regiões comuns de ocorrência
 - Face de sucção de máquinas hidráulicas
 - Entrada de bombas
 - Saída de turbinas
 - Face de jusante de válvulas
 - Qualquer região **líquida** submetida a pressões reduzidas

Diagrama de fase, T-p, para a água



Ebulição

$P \approx \text{cte}; \uparrow T$
líquido \Rightarrow vapor

Cavitação

$T \approx \text{cte}; \downarrow P$
líquido \Rightarrow vapor

Condensação

$P \approx \text{cte}; \downarrow T$ ou
 $T \approx \text{cte}; \uparrow P$
vapor \Rightarrow líquido

Diagrama de fase, T–p, para a água



Água $T = 293,3 \text{ K (} 20^\circ\text{C)}$

Vapor $v = 57,8 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\rho_V = 0,017 \text{ kg/m}^3$

v: volume específico

líquido $v = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\rho_L = 998,3 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{\rho_L}{\rho_V} = \frac{998,3}{0,017} = 58723$$

A energia envolvida na transformação erode superfícies sólidas quando as bolhas **implodem** sobre elas

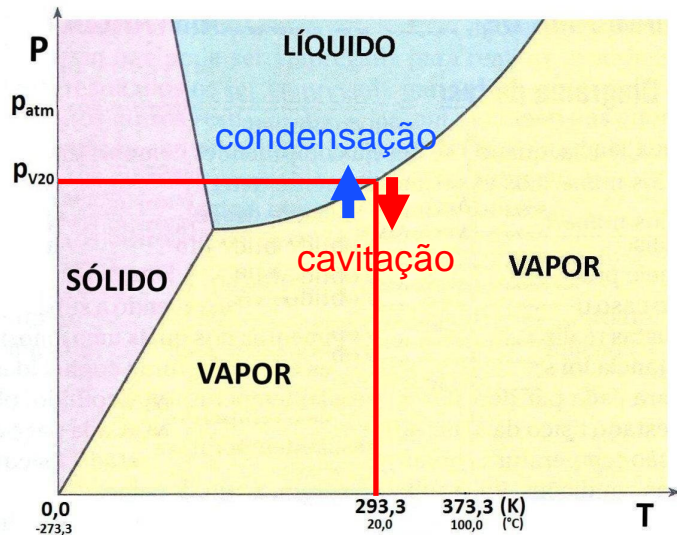


Diagrama de fase, T–p, para a água



Água $T = 293,3 \text{ K (} 20^\circ\text{C)}$

Vapor $v = 57,8 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\rho_V = 0,017 \text{ kg/m}^3$

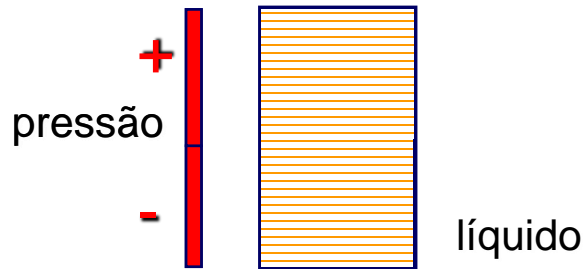
v: volume específico

líquido $v = 0,001 \text{ m}^3/\text{kg}$ $\rho_L = 998,3 \text{ kg/m}^3$

$$\frac{\rho_L}{\rho_V} = \frac{998,3}{0,017} = 58723$$

A energia envolvida na transformação erode superfícies sólidas quando as bolhas **implodem** sobre elas

A massa específica



58723 x

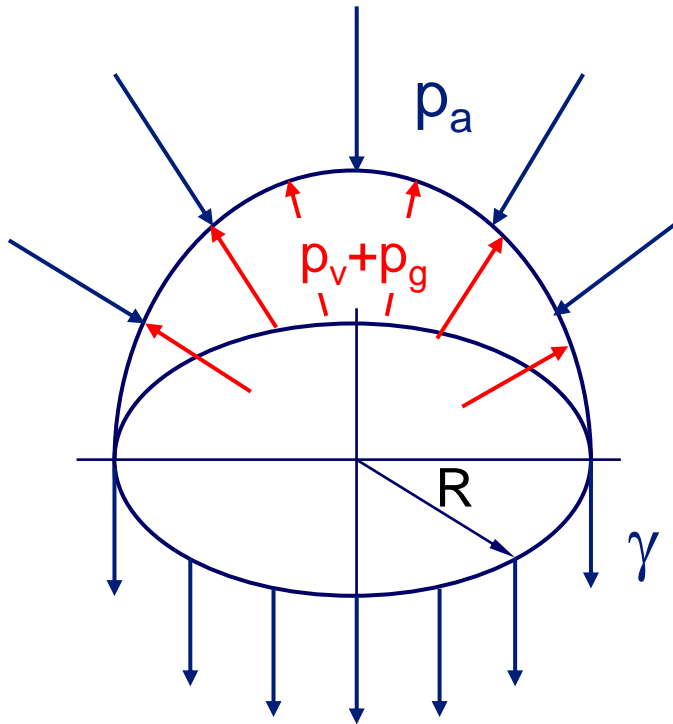
em centésimos de segundo

Com as micro-bolhas carregando energia suficiente para erodir superfícies sólidas ao implodir sobre elas



- **Cavitação: ocorrência condicionada à presença de gás no meio líquido.**
 - Núcleos de gás induzem a vaporização, oferecendo vazios para receber o vapor gerado,
 - Apenas se os núcleos de gás se tornarem instáveis e crescerem com a queda de pressão viabiliza-se a cavitação,
 - A cavitação não ocorre em líquidos desgaseificados, independentemente das pressões a que possam ser submetidos.
- **Desenvolvimento das microbolhas**
 - Formam-se em regiões de baixa pressão,
 - Crescem durante deslocamento em campo de pressões reduzidas, ao atingir campo de pressões crescente:
 - se continuam crescendo, explodem ao atingir campos de pressões elevadas, sem maiores consequências.
 - se decrescem, implodem ao atingir campos de pressões elevadas, gerando micro jatos que podem erodir superfícies sólidas.

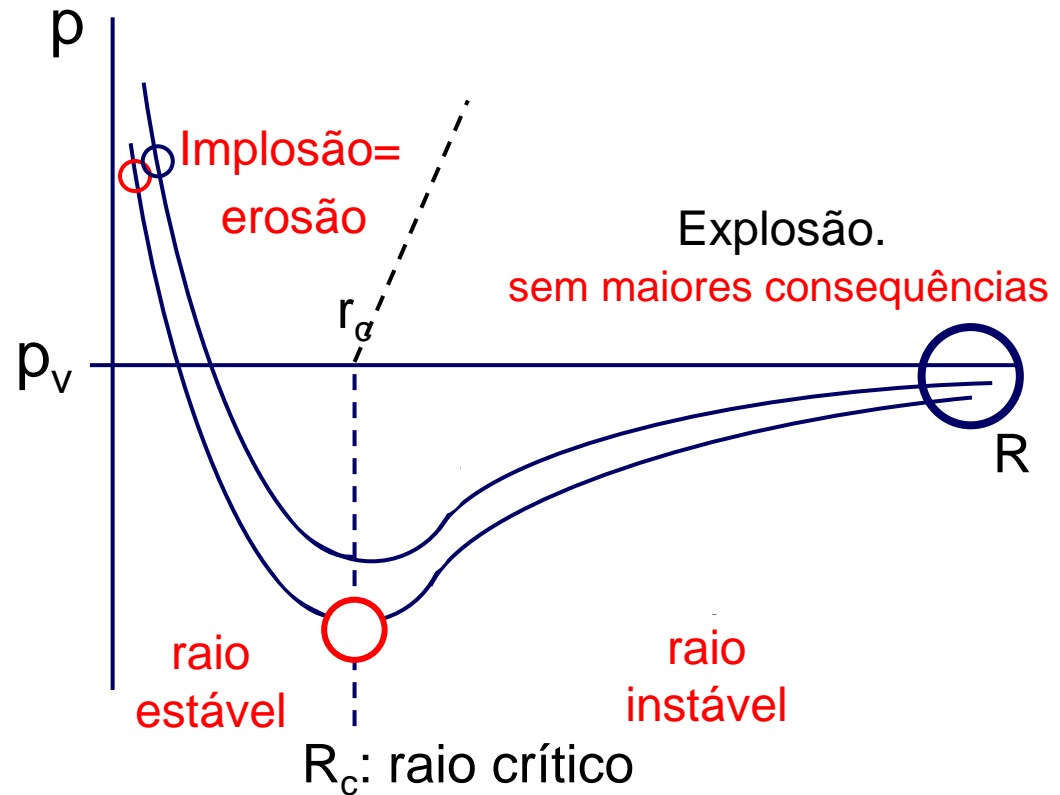
Equilíbrio de microbolha esférica



$$p_\gamma = \frac{2\gamma}{R} \quad p_g = \frac{K}{R^3} \quad \text{Equilíbrio}$$

$$p_a + p_\gamma = p_v + p_g$$

Estabilidade da bolha



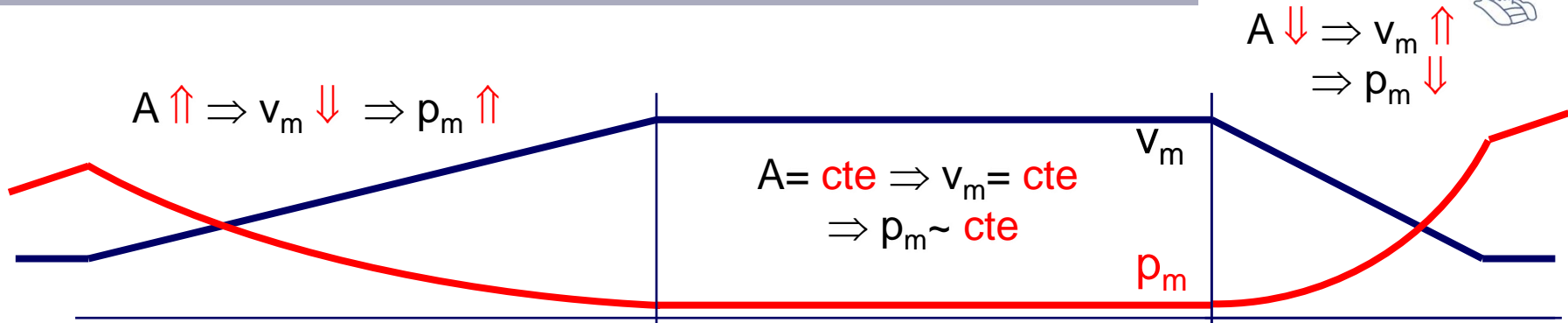
p_a : pressão ambiente

γ : tensão superficial do líquido

p_v : pressão de vapor do líquido

p_g : pressão do gás dissolvido

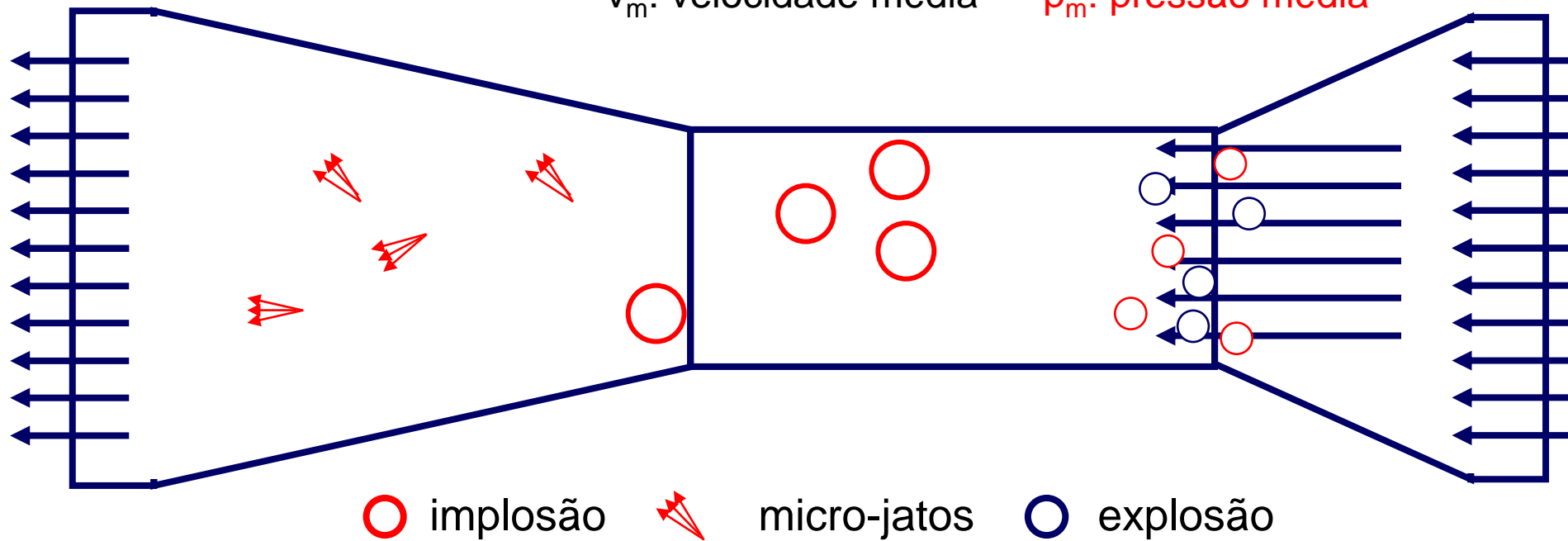
Desenvolvimento das microbolhas



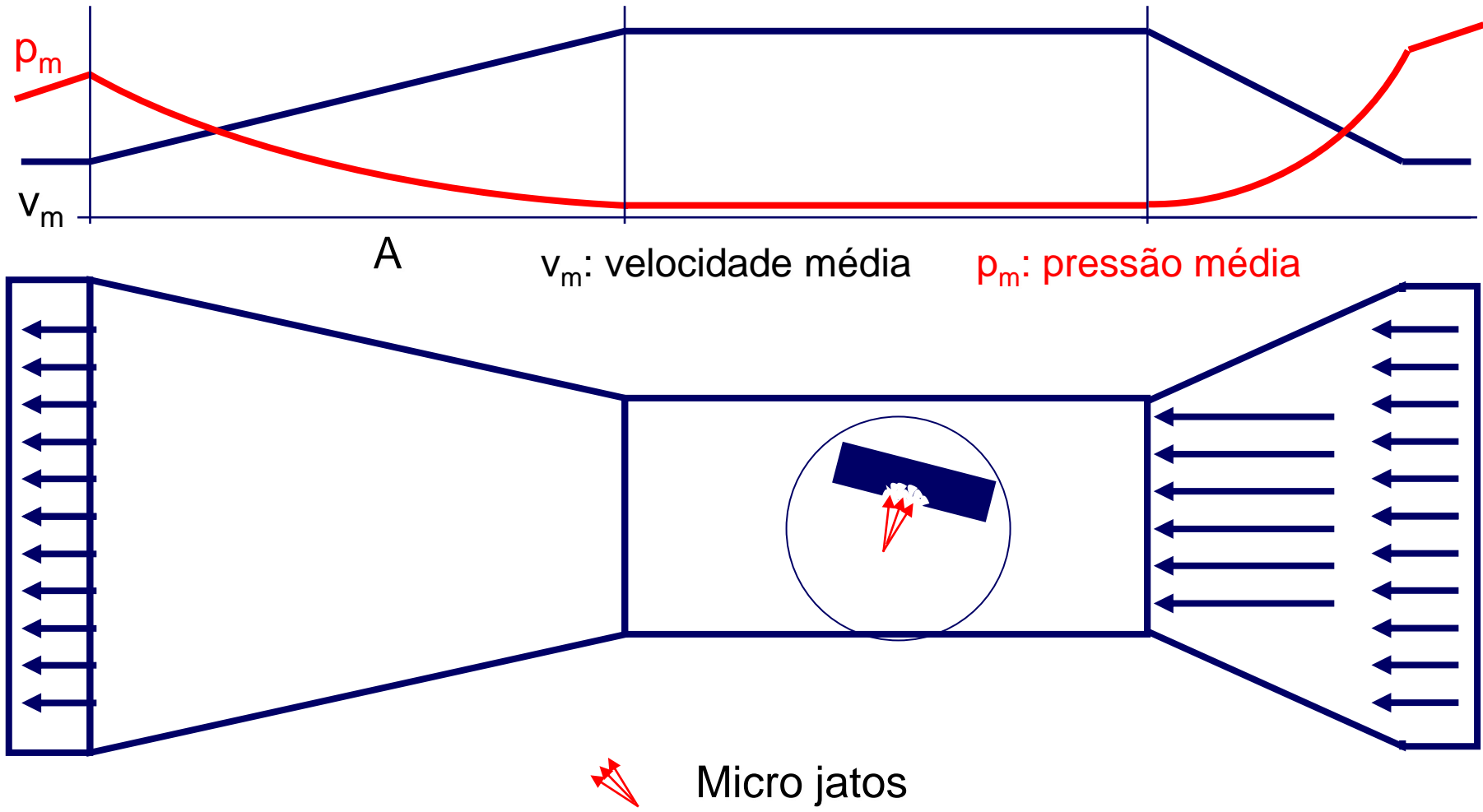
v_m : velocidade média

p_m : pressão média

A



Ação dos micro jatos



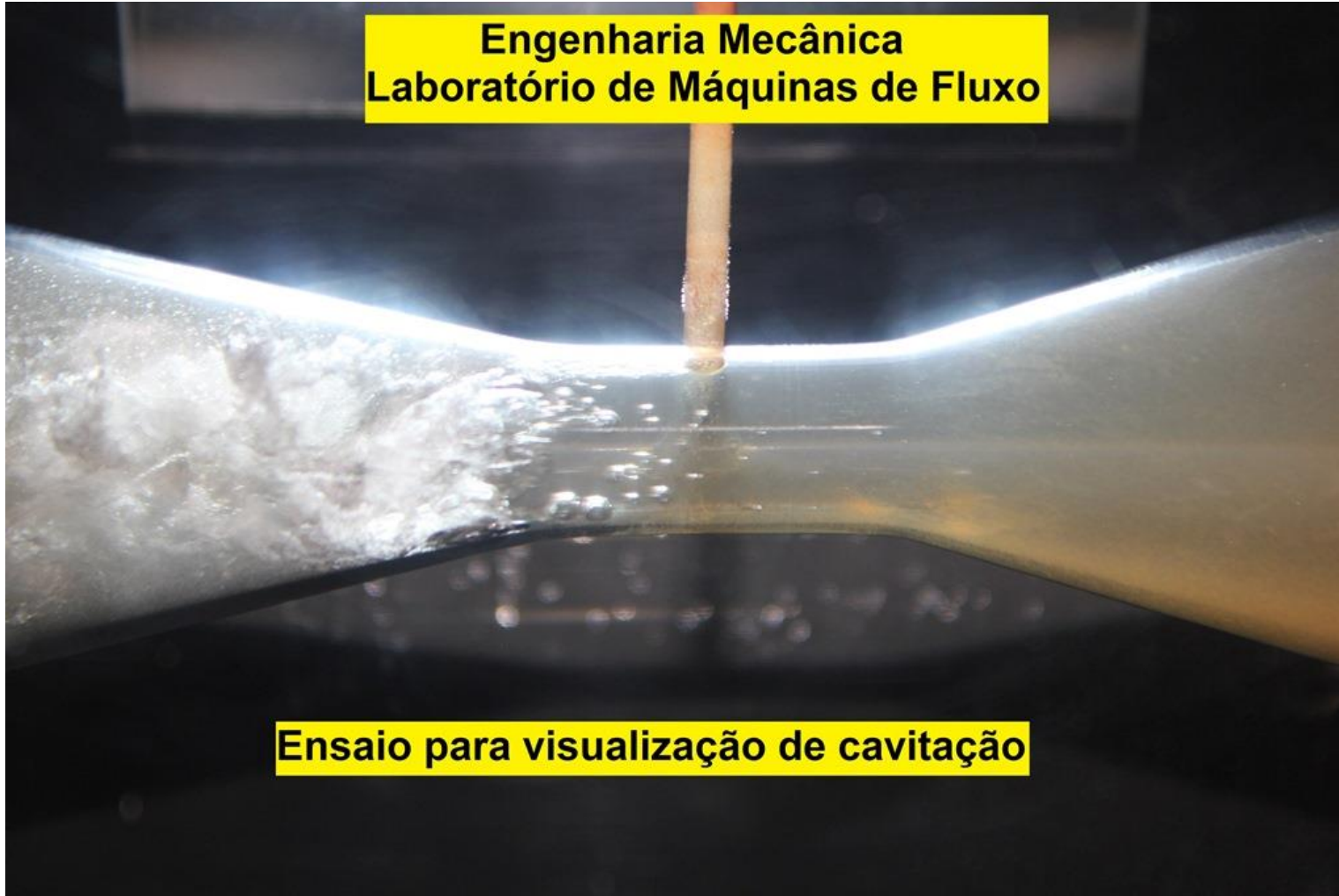
Cavitação em tubo de venturi



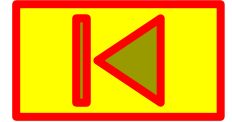
Cavitação em tubo de venturi



**Engenharia Mecânica
Laboratório de Máquinas de Fluxo**

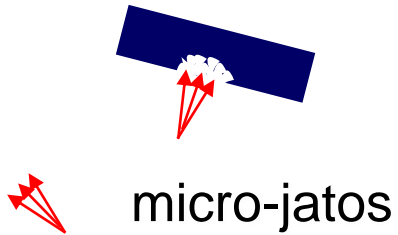


Ensaio para visualização de cavitação

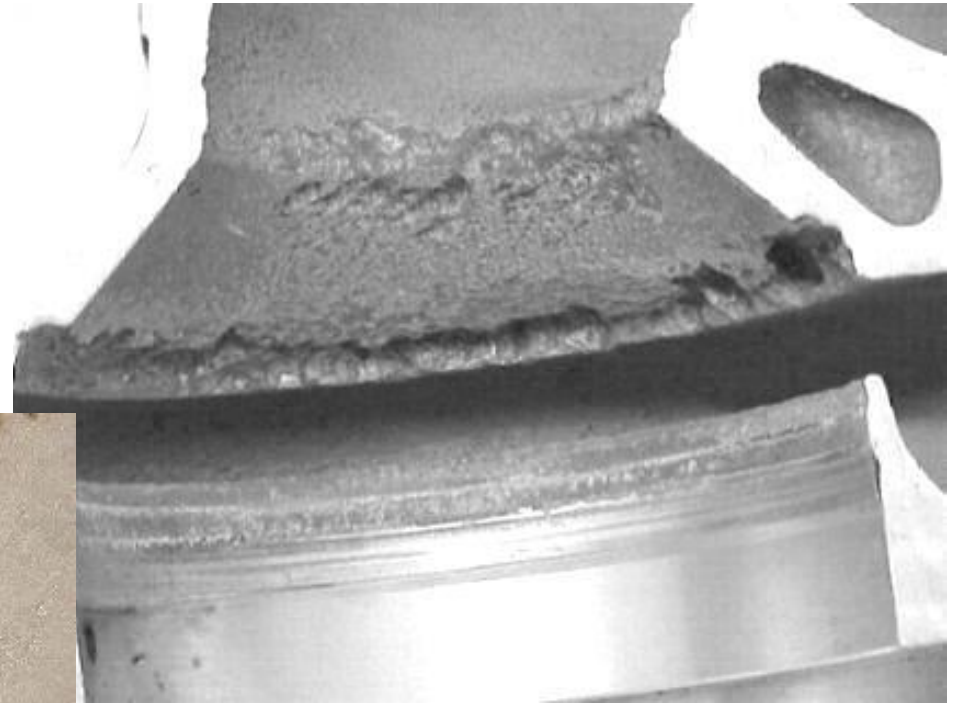


Filmagem

Ação dos micro jatos



Turbina Francis (Ilha Solteira)



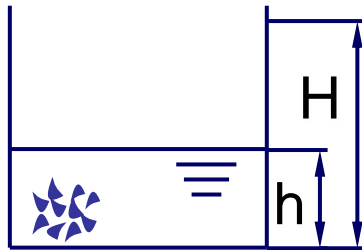
Bomba d'água veicular (alumínio)

Combate à cavitação



- **Identificação de ocorrência**
 - Ruído típico: “esfregar de areia contra superfícies”
 - Queda de desempenho em máquinas
 - Bloqueio de vazão em válvulas
- **Combate à cavitação**

aumento da
pressão
estática local



Difícil de viabilizar após estar a
instalação construída.

alteração na
forma dos
perfís



eleva
campo de
pressões

Exige novo projeto e a construção
de nova máquina.

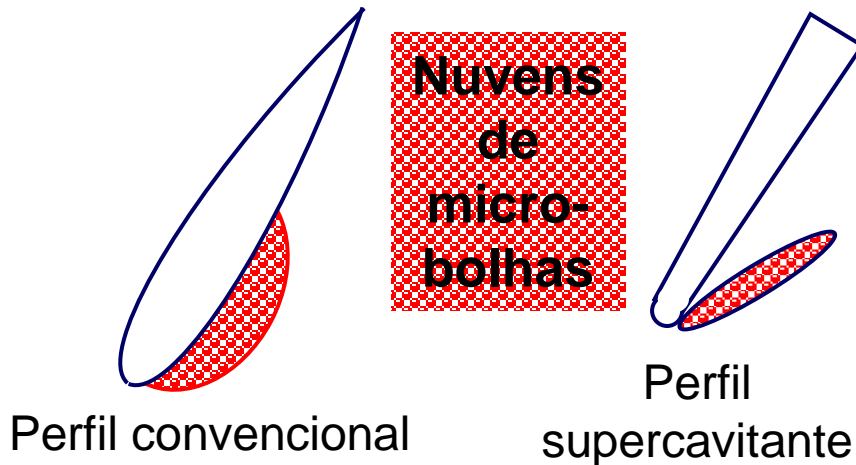


- **Combate à cavitação**

Material mais resistente	Aço inoxidável	Não atua sobre o fenômeno, apenas aumenta a resistência à erosão e o intervalo entre manutenções.
Injeção de ar comprimido *	Eleva campo de pressões local	Aumenta o volume de gás na região de cavitação.

- **Perfis supercavitantes**

* Exclusivo para turbinas



Evita o ataque dos micro jatos sobre a superfície sólida.

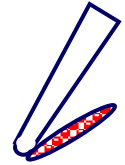
Ainda não aplicável em máquinas.

Perfil não hidrodinâmico impõe rendimentos baixos às máquinas.

Perfil supercavitante



Supercavitação
Perfil supercavitante



- Evita o ataque dos micro jatos sobre a superfície sólida.
- Ainda não aplicável em máquinas
- Perfil não hidrodinâmico impõe rendimentos baixos às máquinas.



Aerobarco
Rio-Niteroi



Parâmetros de cavitação

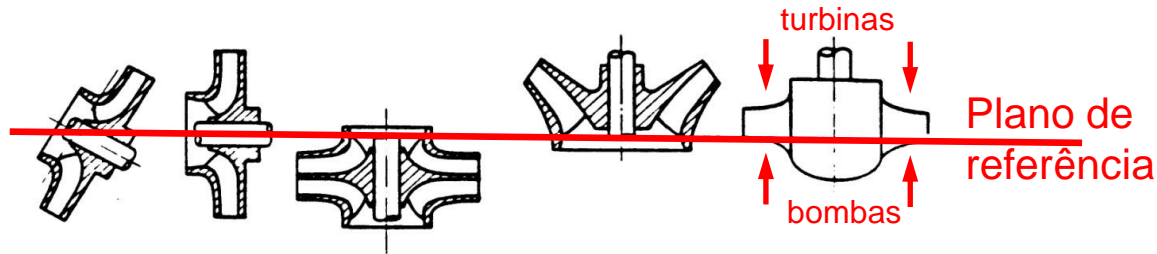


- NPSH → *Net Positive Suction Head*

Carga absoluta líquida na sucção

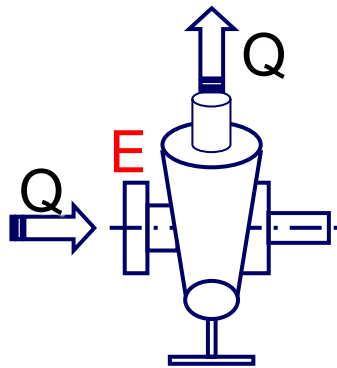
(determinada a partir de referencial pré-definido)

Para máquinas



sempre na condição de menor pressão.

A partir de ensaio



$$NPSH = \frac{p_{E\ abs} - p_{v\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g}$$

pelo equipamento

Medido = NPSH requerido = $NPSH_r \equiv NPSH_{3\%}$

$$NPSH_r = NPSH_{3\%} = \frac{p_{E\ abs} - p_{v\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} \quad \text{independe da instalação}$$

Parâmetros de cavitação



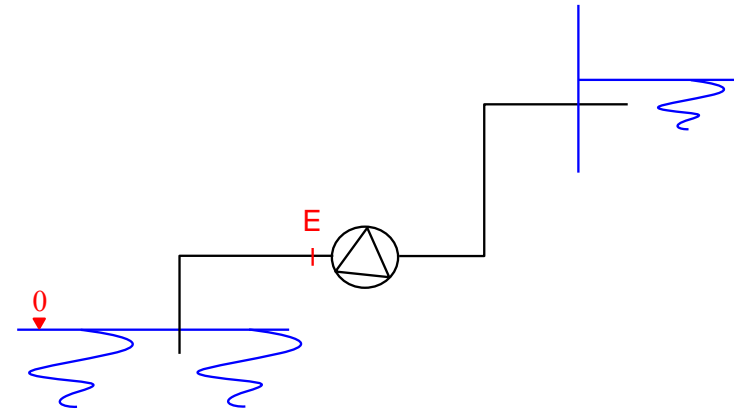
$$NPSH = \frac{p_{E\ abs} - p_{v\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g}$$

$$NPSH = \left(\frac{p_{E\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} \right) - \frac{p_{v\ abs}}{\rho g}$$

$$\frac{p_{0\ abs}}{\rho g} + z_0 = \left(\frac{p_{E\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g} \right) + z_E + \Delta h_s$$

$$NPSH = \frac{p_{0\ abs}}{\rho g} + z_0 - z_E - \Delta h_s - \frac{p_{v\ abs}}{\rho g}$$

$$NPSH = \underbrace{\frac{p_{0\ abs}}{\rho g}}_{H_{atm}} - \underbrace{\frac{p_{v\ abs}}{\rho g}}_{h_v} - \underbrace{(z_E - z_0) - \Delta h_s}_{H_s}$$



Bernoulli

Parâmetros de cavitação

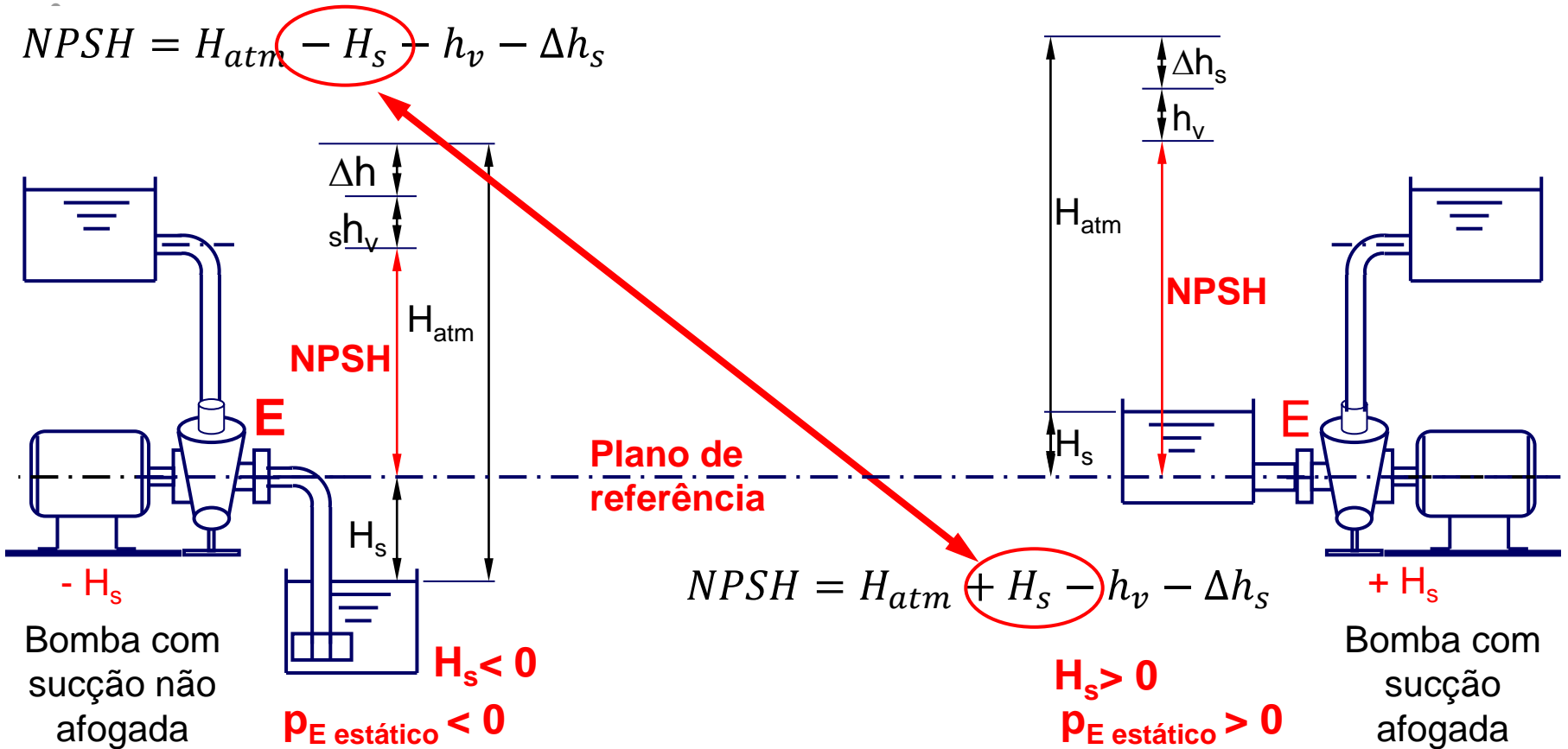


- NPSH → *Net Positive Suction Head*

Carga absoluta líquida (determinada a partir de referencial pré-definido)

A partir da instalação

$$NPSH = H_{atm} - H_s - h_v - \Delta h_s$$



Parâmetros de cavitação

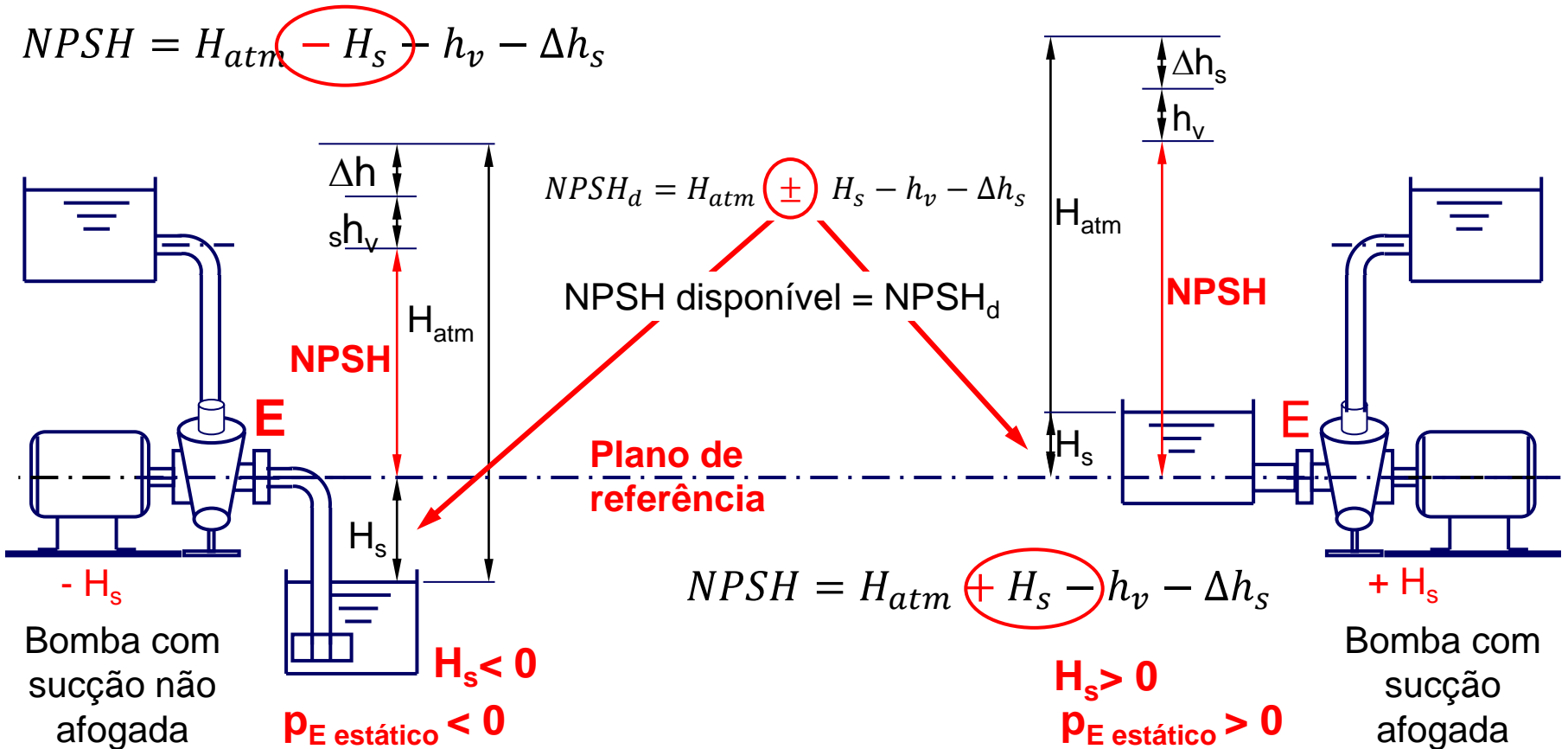


- NPSH → *Net Positive Suction Head*

Carga absoluta líquida (determinada a partir de referencial pré-definido)

A partir da instalação

$$NPSH = H_{atm} - H_s - h_v - \Delta h_s$$



Parâmetros de cavitação



- NPSH → *Net Positive Suction Head*

Carga absoluta líquida (determinada a partir de referencial pré-definido)

A partir da instalação

NPSH disponível = $NPSH_d$

A partir de ensaio

NPSH requerido = $NPSH_r = NPSH_{3\%}$

$$NPSH_d = H_{atm} \pm H_s - h_v - \Delta h_s$$

$$NPSH_r = NPSH_{3\%} = \frac{p_{E\ abs} - p_{v\ abs}}{\rho g} + \frac{v_E^2}{2g}$$

Se $NPSH_d < NPSH_r$ sempre ocorrerá cavitação

Se $NPSH_d = NPSH_r$ ocorrerá cavitação inevitável

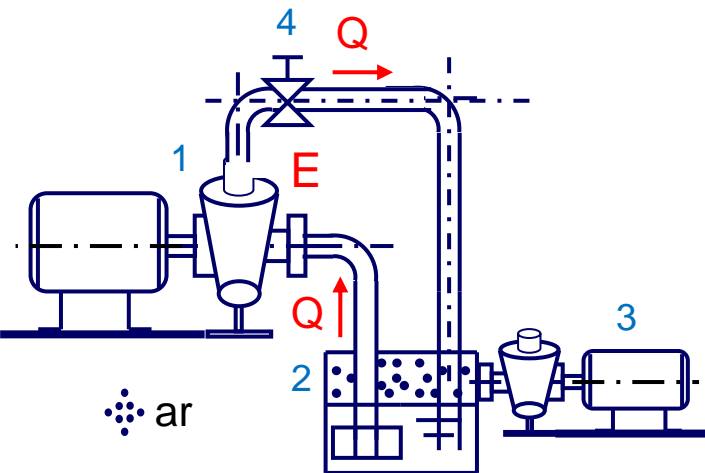
Se $NPSH_d > NPSH_r$ poderá ou ocorrer cavitação dependendo de quão maior for o valor disponível com relação ao requerido

Determinação do NPSH requerido

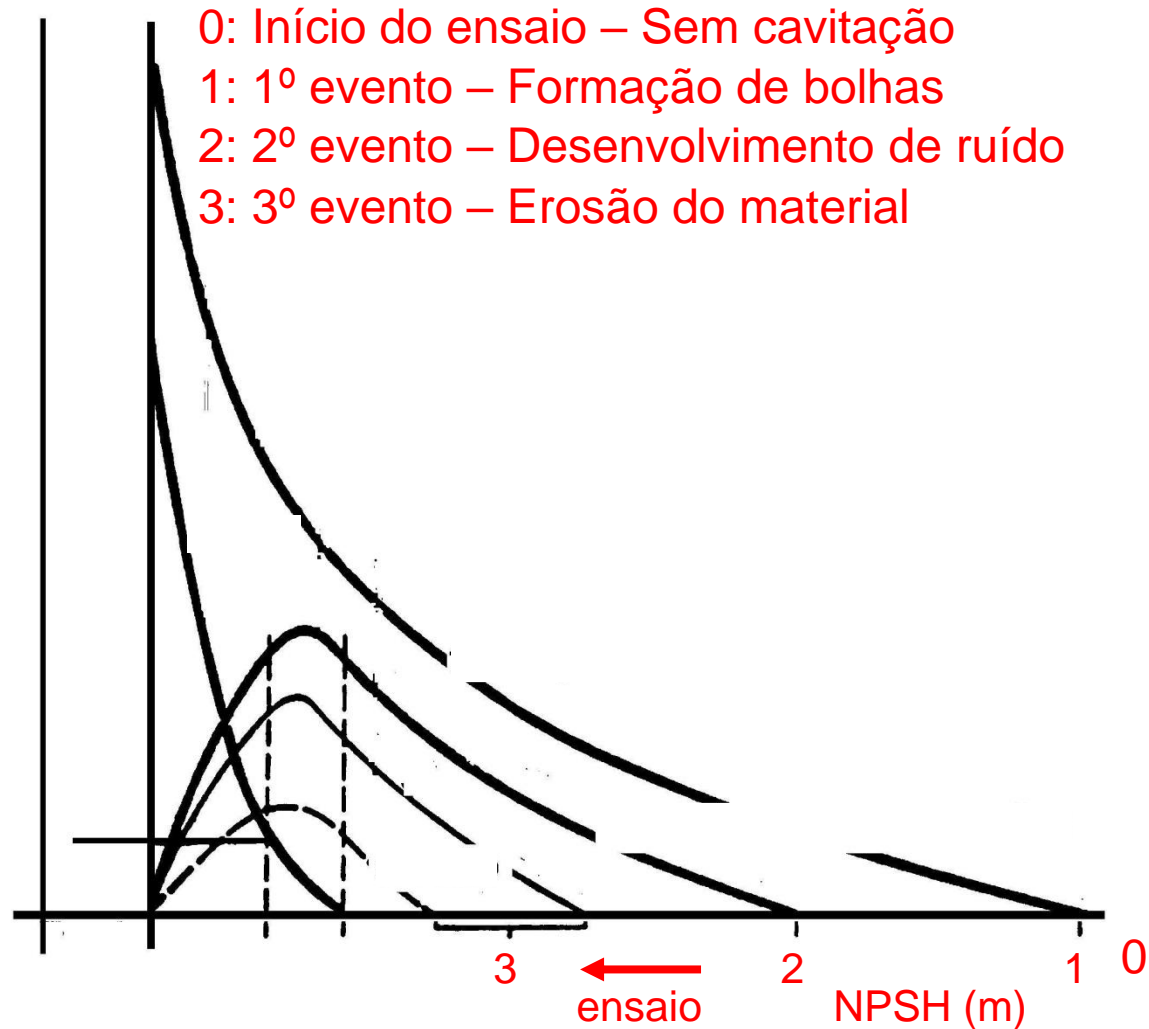


Ensaio: redução do NPSH

Bancada de ensaio
(circuito fechado)



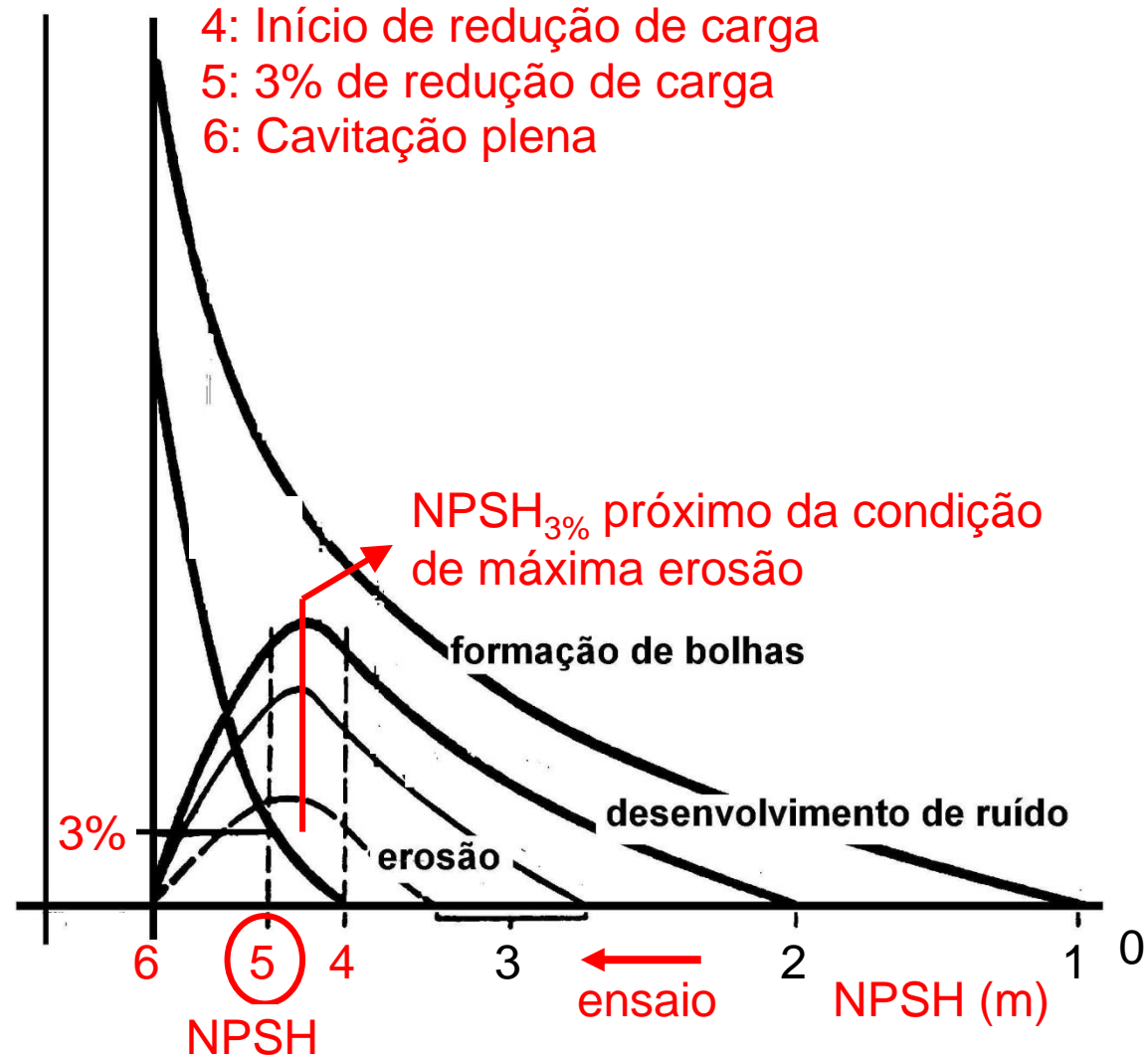
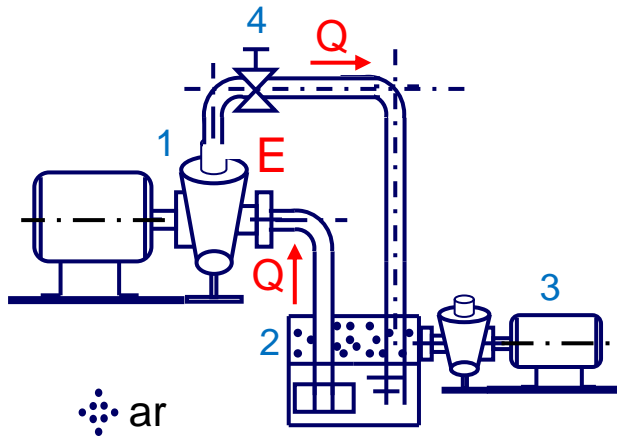
- 1: bomba a ensaiar
- 2: reservatório de sucção, fechado e hermético
- 3: bomba de vácuo
- 4: controle de vazão



Determinação do NPSH requerido



Bancada de ensaio
(circuito fechado)

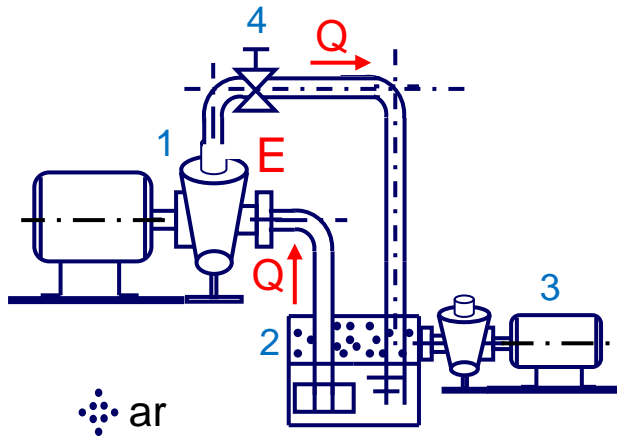


- 1: bomba a ensaiar
 - 2: reservatório de sucção, fechado e hermético
 - 3: bomba de vácuo
 - 4: controle de vazão
- 0: Início do ensaio – Sem cavitação
1: 1º evento – Formação de bolhas
2: 2º evento – Desenvolvimento de ruído
3: 3º evento – Erosão do material

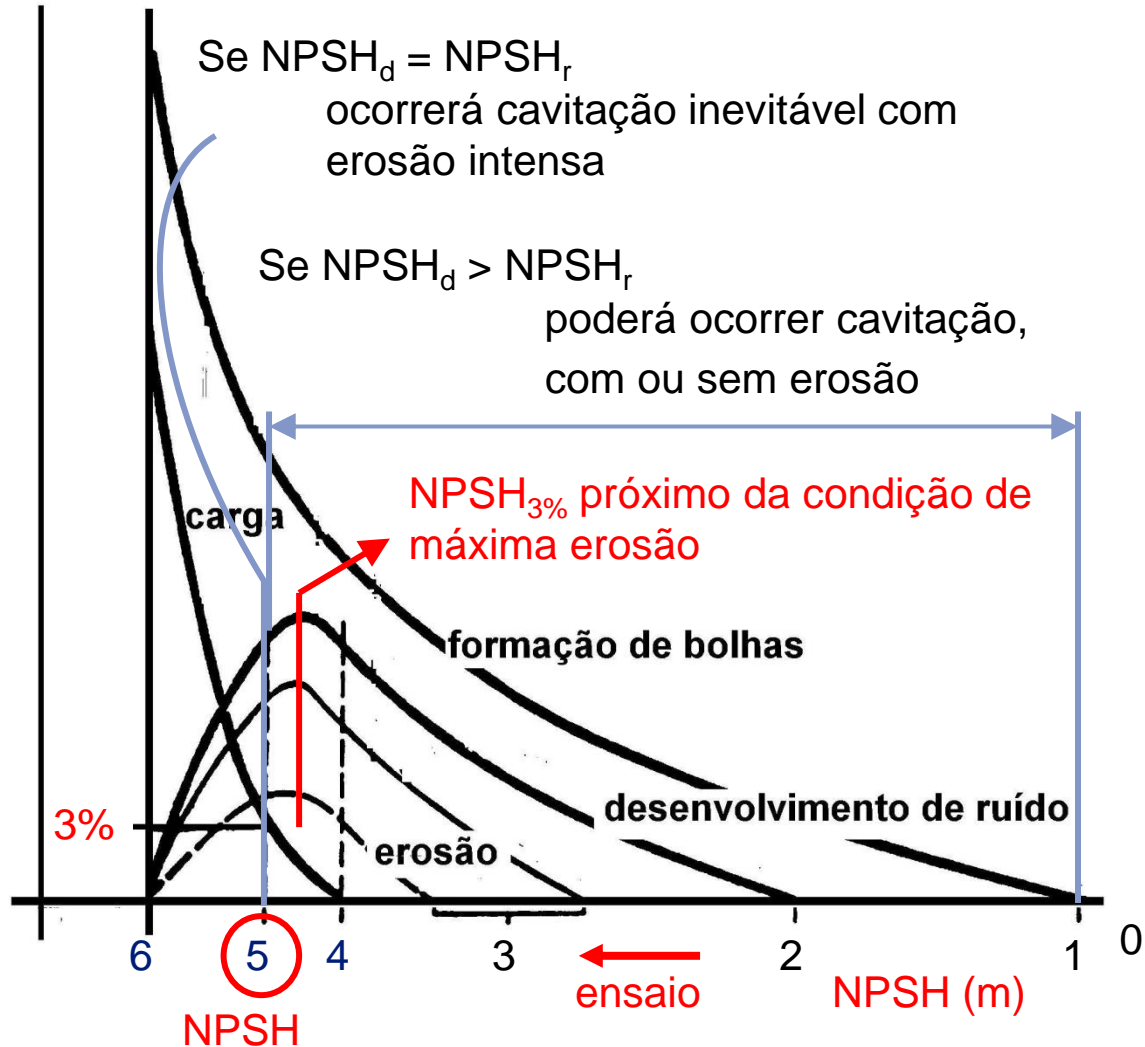
Determinação do NPSH requerido



Bancada de ensaio
(circuito fechado)



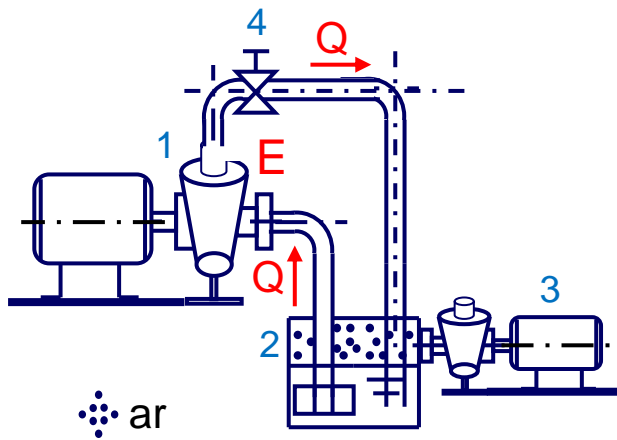
- 1: bomba a ensaiar
- 2: reservatório de sucção, fechado e hermético
- 3: bomba de vácuo
- 4: controle de vazão



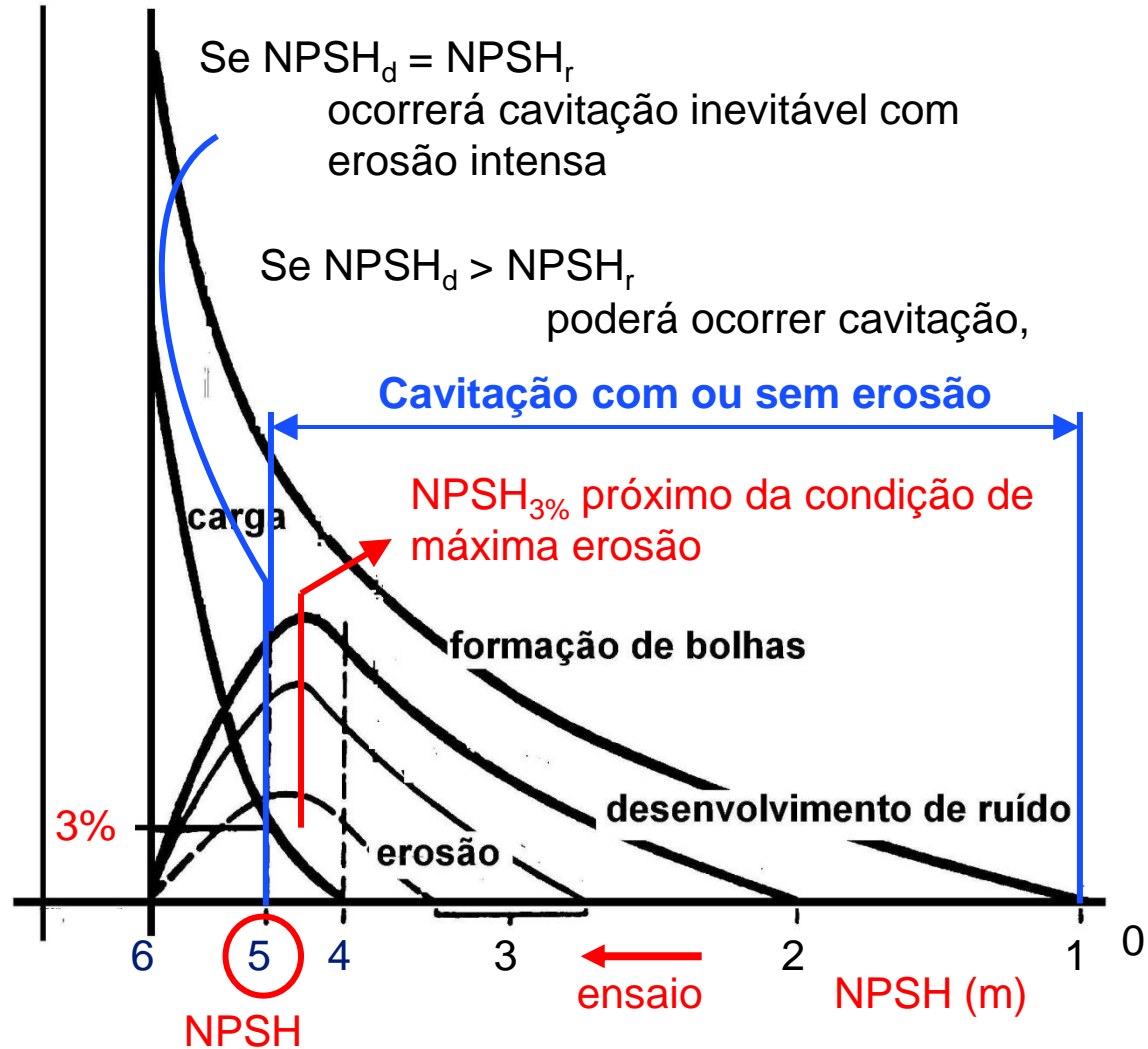
Determinação do NPSH requerido



Bancada de ensaio
(circuito fechado)



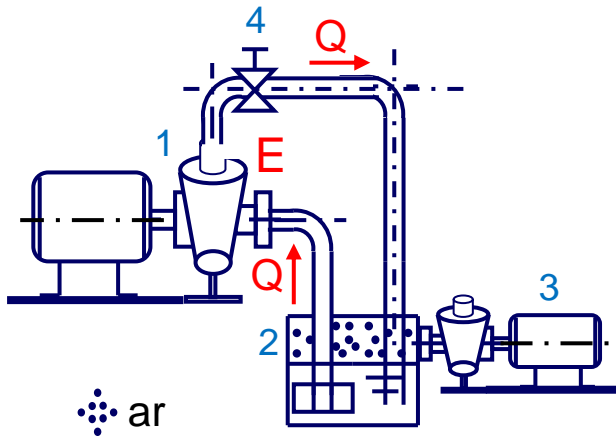
- 1: bomba a ensaiar
- 2: reservatório de sucção, fechado e hermético
- 3: bomba de vácuo
- 4: controle de vazão



Determinação do NPSH requerido



Bancada de ensaio
(circuito fechado)

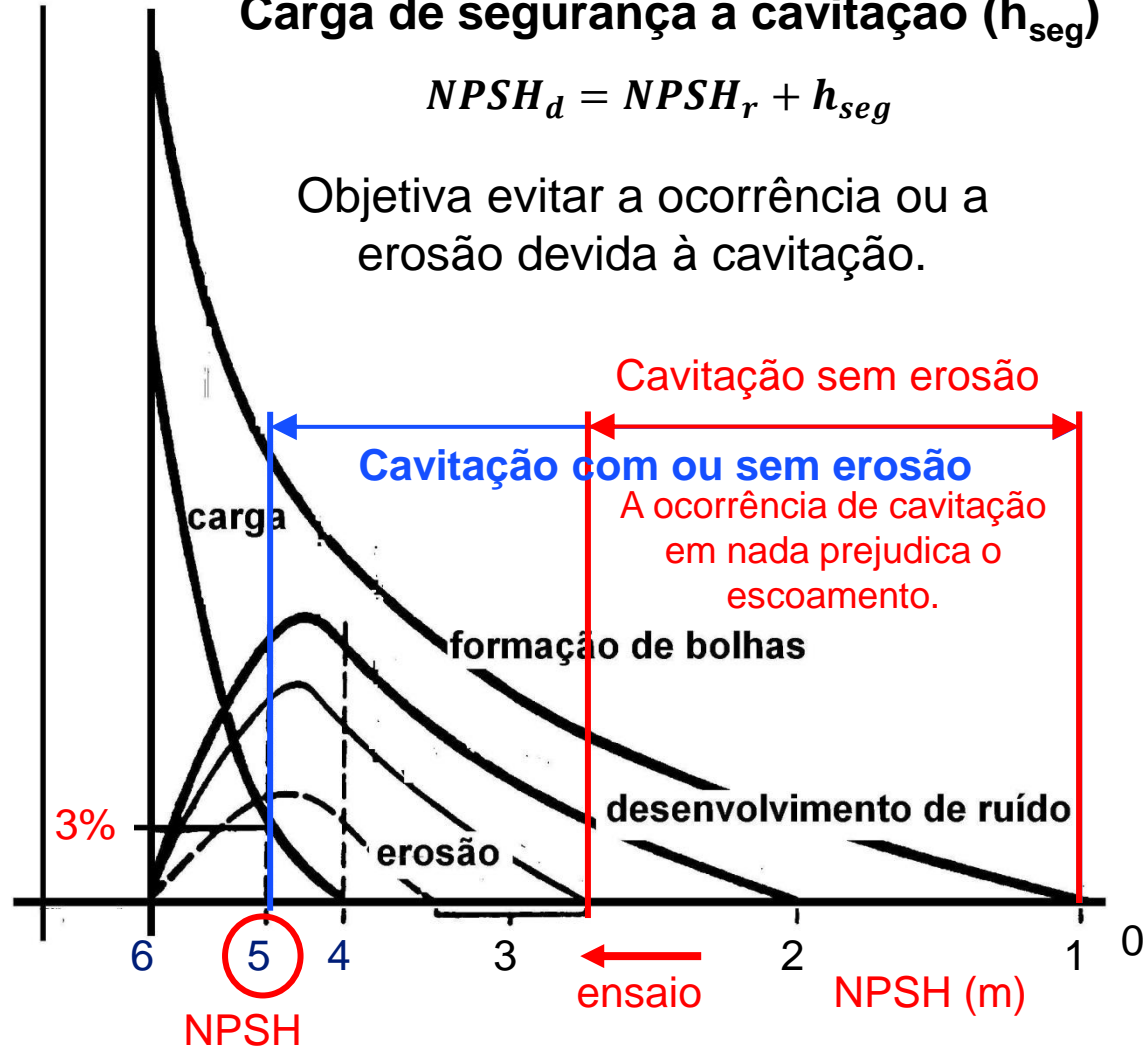


- 1: bomba a ensaiar
- 2: reservatório de sucção, fechado e hermético
- 3: bomba de vácuo
- 4: controle de vazão

Carga de segurança a cavitação (h_{seg})

$$NPSH_d = NPSH_r + h_{seg}$$

Objetiva evitar a ocorrência ou a erosão devida à cavitação.





σ : Coeficiente de Thoma adimensionalização do NPSH
Aplicado a máquinas hidráulicas.

$$\sigma = \frac{NPSH_r}{H}$$

→ NPSH_r requerido
→ Carga no ponto onde foi determinado o NPSH_r

$$\frac{n_q}{n_{qc}} = \sigma^{0,75}$$

n_q: rotação específica
n_{qc}: rotação específica referida à cavitação

Fator ou coeficiente de cavitação

Aplicado a estruturas hidráulicas que não máquinas

$$\sigma = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho v^2} = \frac{p_{aa} - p_{va}}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

p_{aa}: pressão local (absoluta)
p_{va}: pressão de vapor (absoluta)
v: velocidade do escoamento

Pré-avaliação dos parâmetros de cavitação



Turbinas

Francis $\sigma = 4,68 \times 10^{-4} n_q^{1,41}$

Kaplan $\sigma = 4,24 \times 10^{-4} n_q^{1,46}$

n_q : rotação específica da turbina no ponto ótimo

Bomba-turbina

$\frac{H_b \text{ máx}}{H_b \text{ mín}} < 1,05 \Rightarrow \sigma = 4,35 \times 10^{-3} n_{qb}^{0,982}$

n_{qb} : rotação específica da bomba-turbina operando como bomba no ponto ótimo

$\frac{H_b \text{ máx}}{H_b \text{ mín}} \geq 1,30 \Rightarrow \sigma = 3,16 \times 10^{-3} n_{qb}^{1,15}$

Bombas $\sigma = 4,68 \times 10^{-4} n_q^{1,41}$ n_q : rotação específica da bomba no ponto ótimo

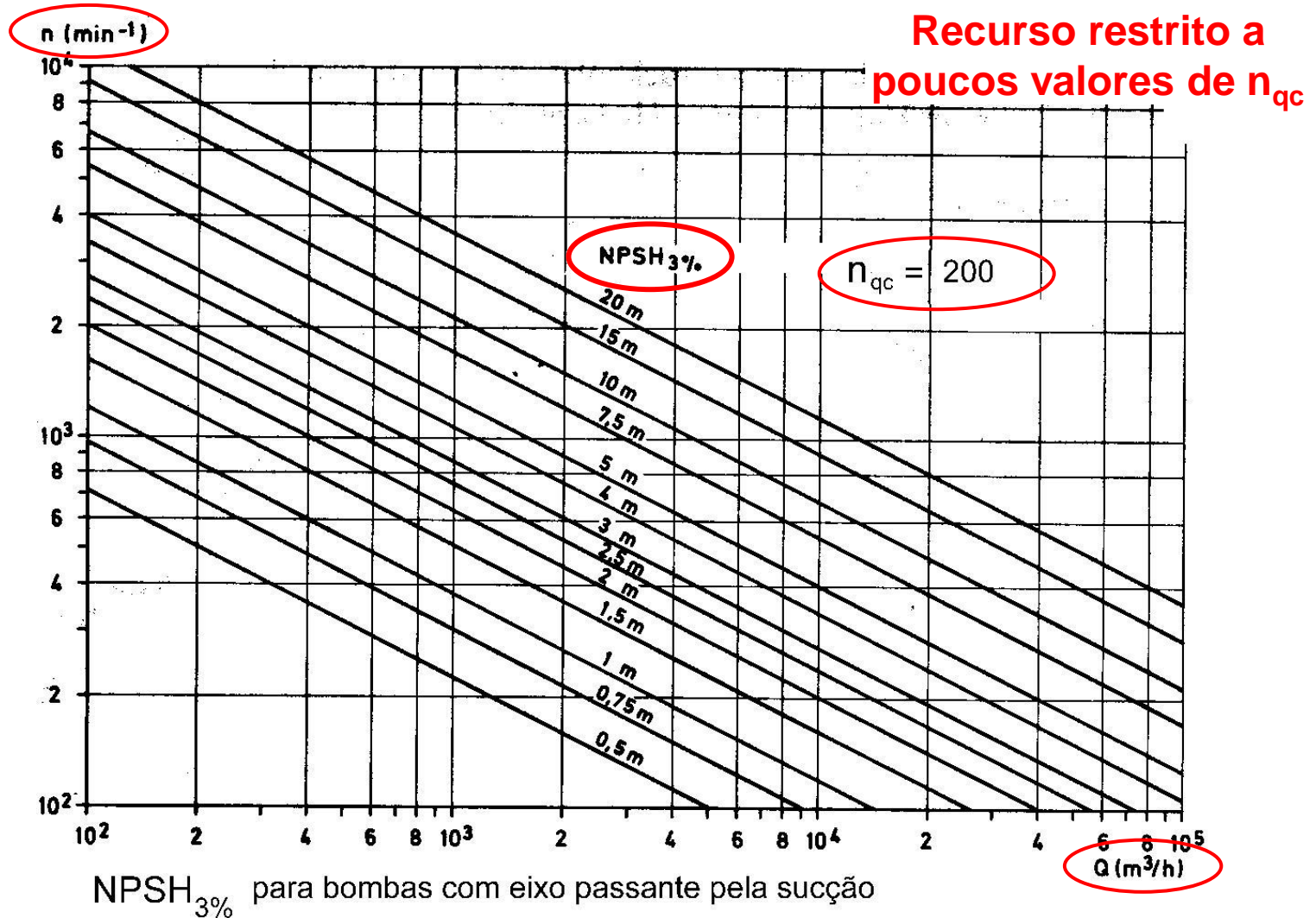
Pouco confiável

Pré-avaliação dos parâmetros de cavitação



Bombas

n_{qc} : rotação específica referida à cavitação



Exemplo de palheta diretriz

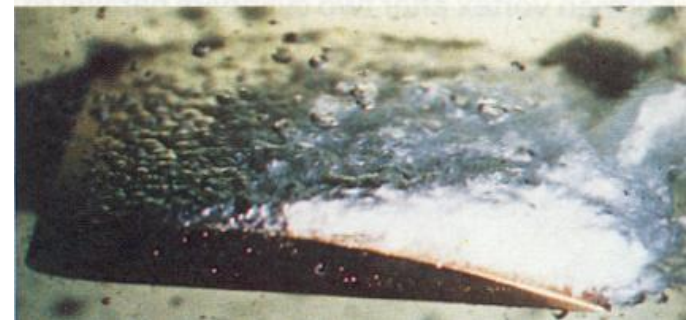
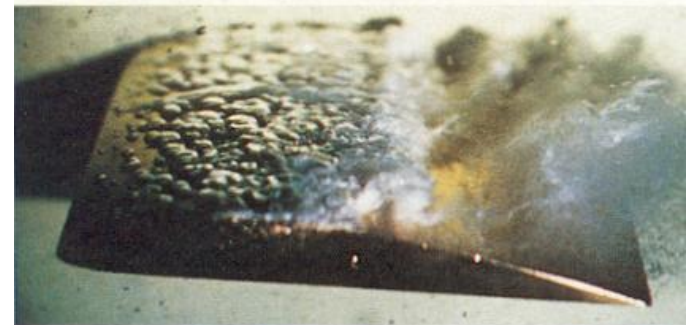
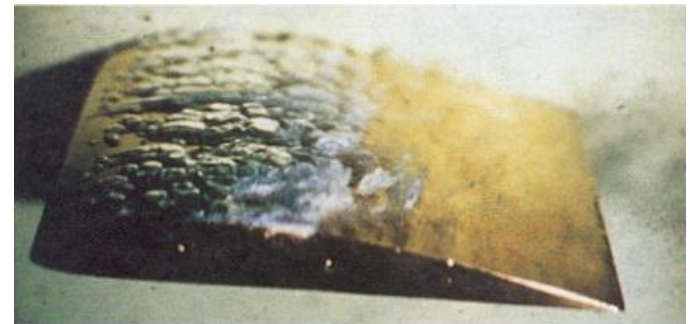


Luz estroboscópica incidindo em frequências diferentes



Mesmo
escoamento

PERFIL DE
PALHETA
DIRETRIZ



Exemplo de bomba hidráulica



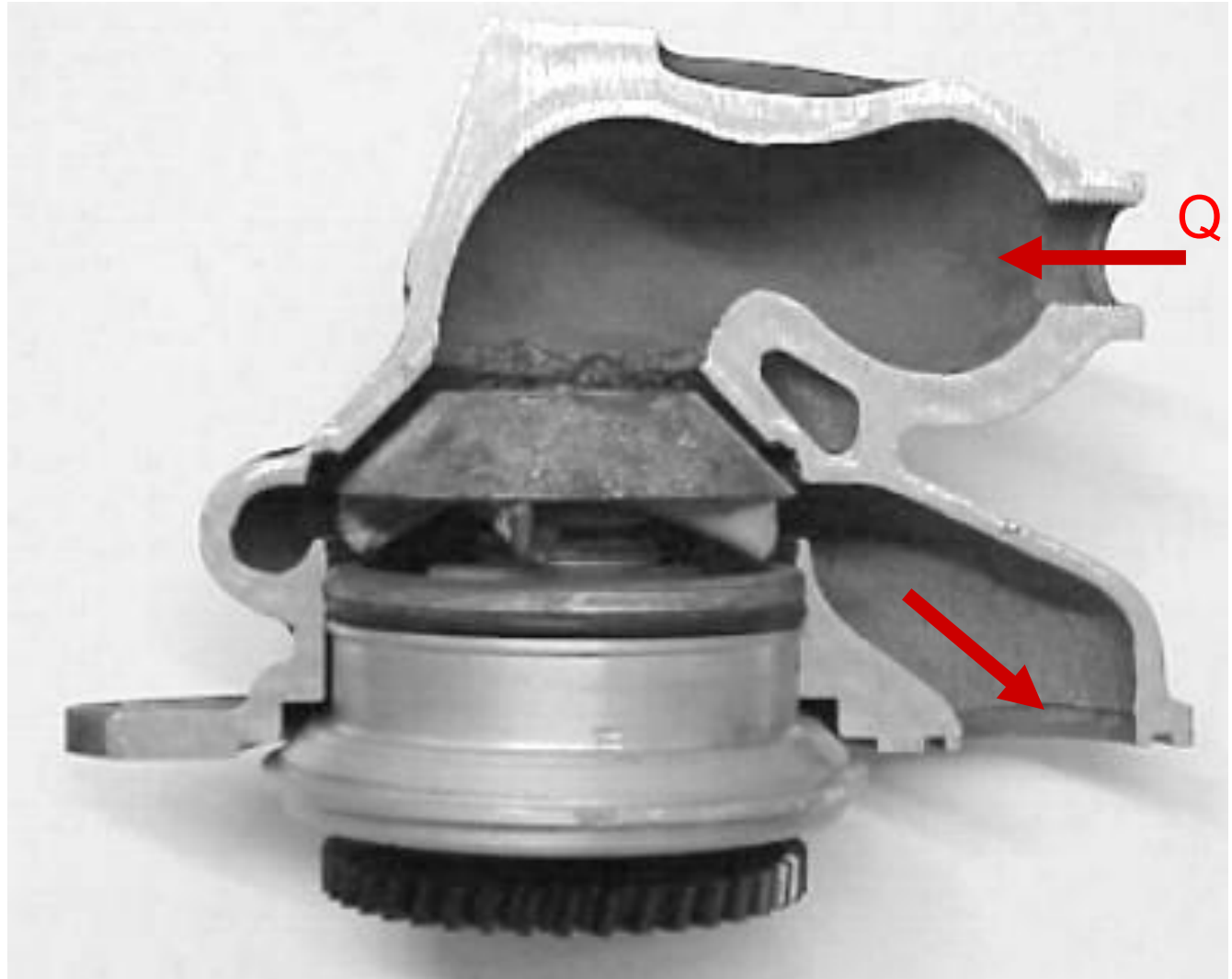
Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



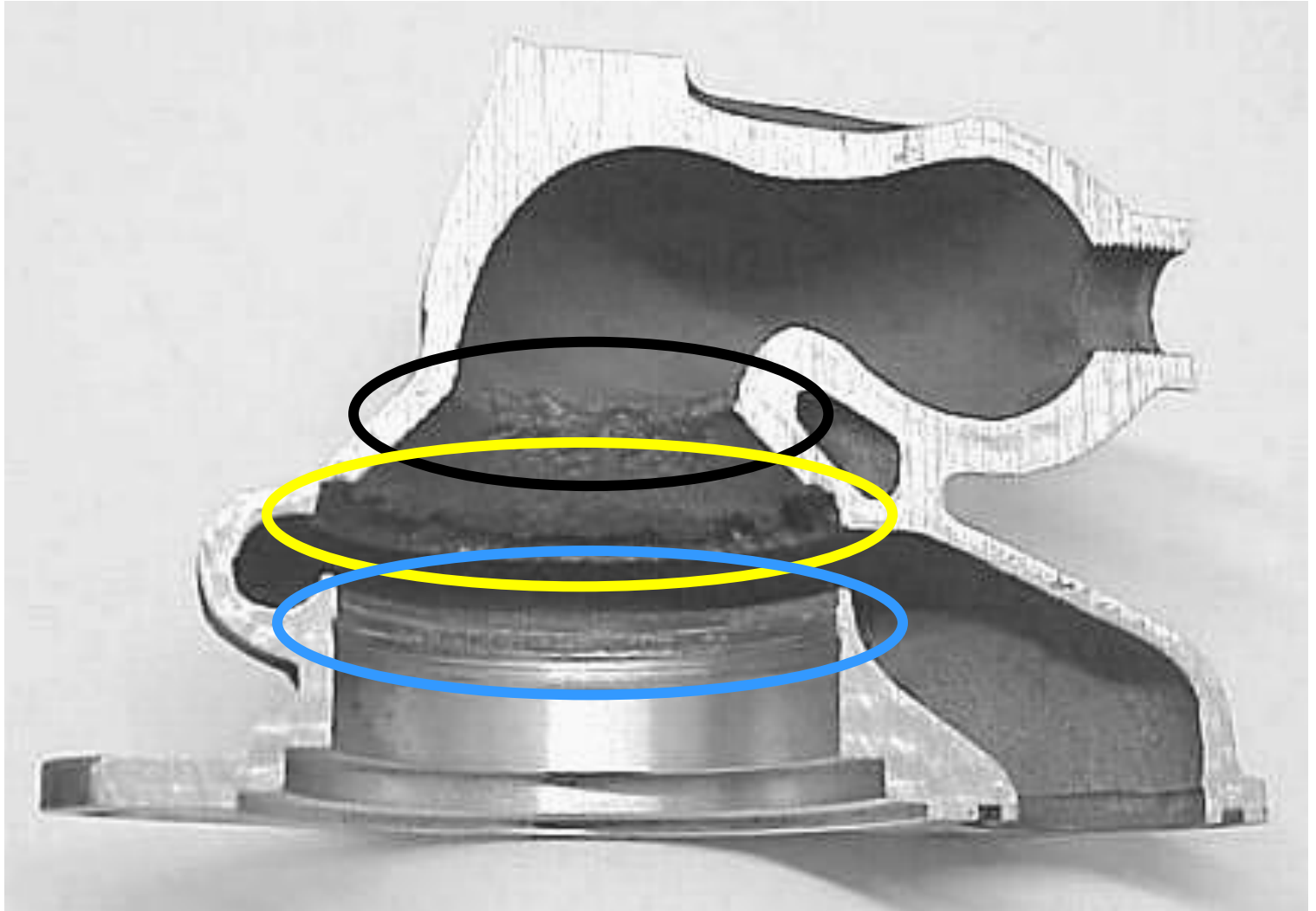
Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



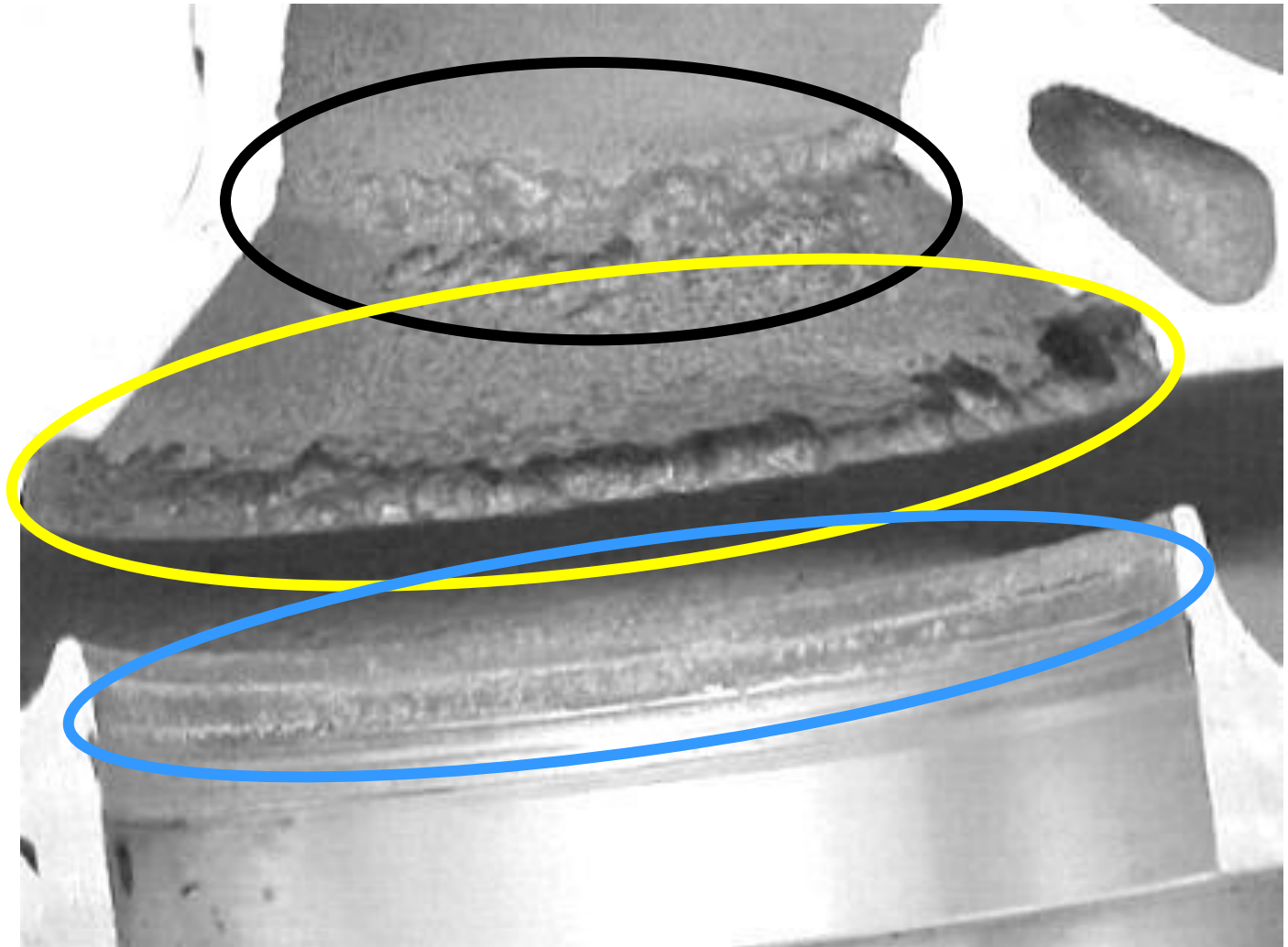
Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



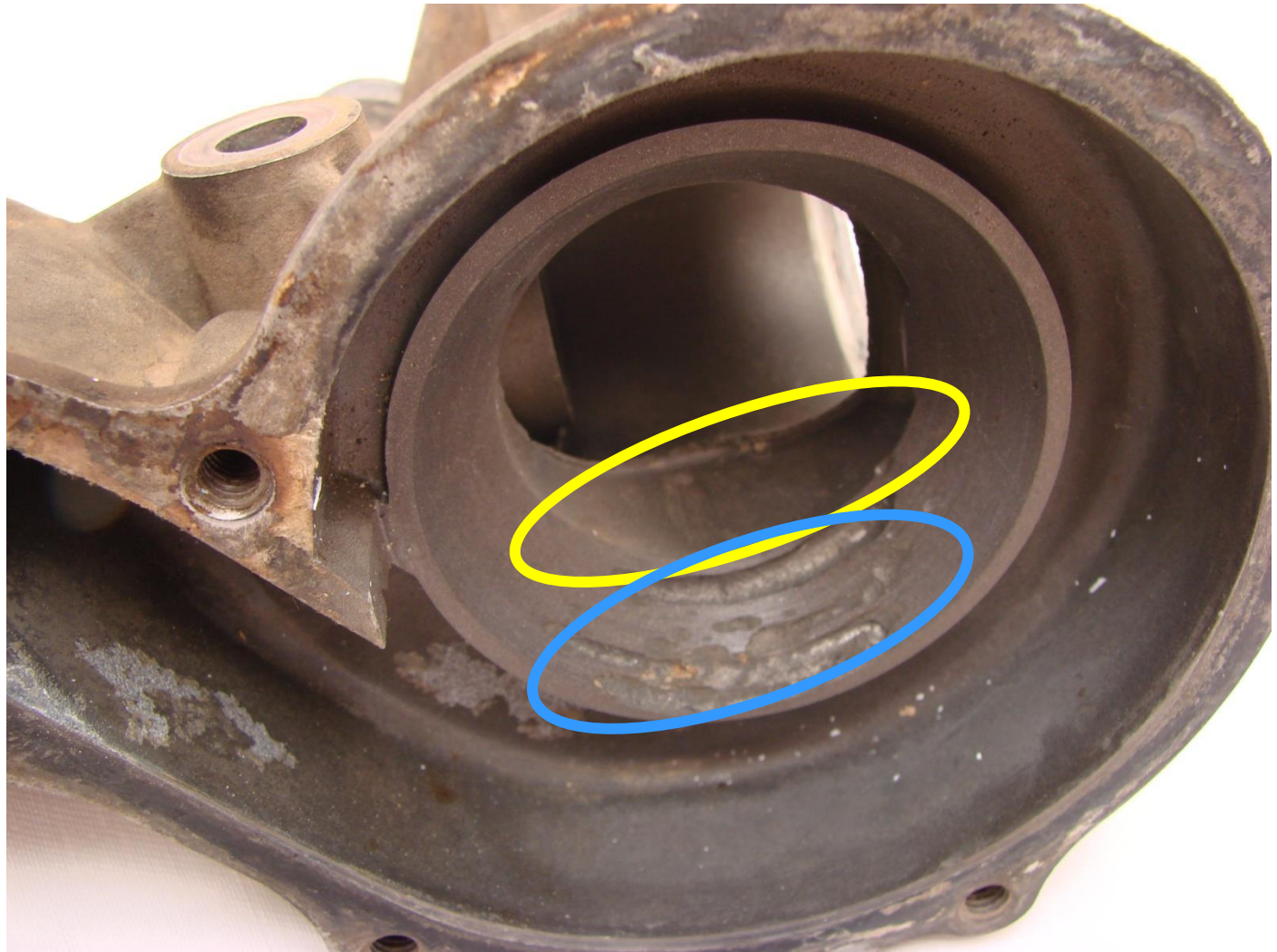
Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



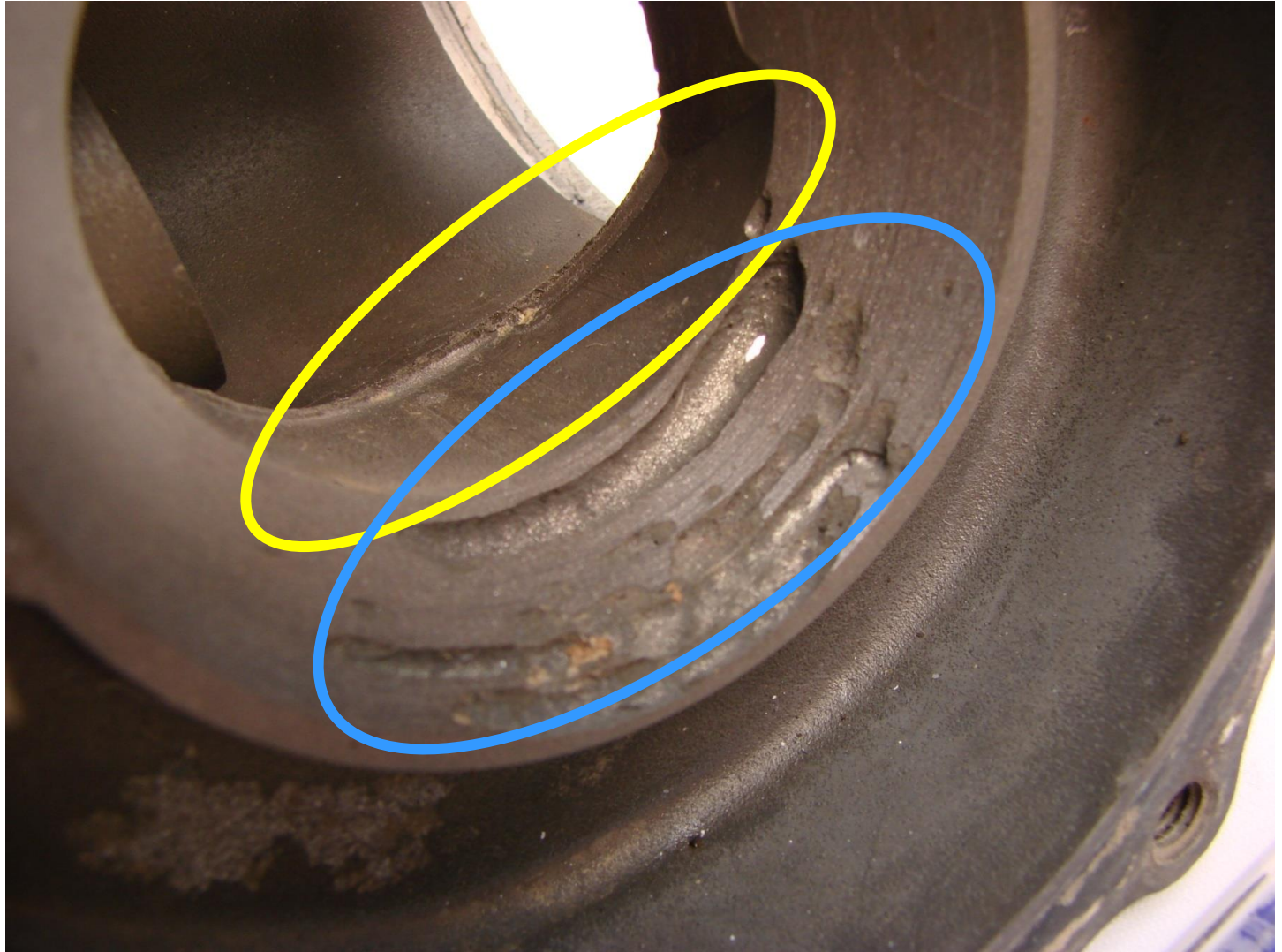
Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Exemplo de bomba hidráulica



Bomba hidráulica de fluxo de arrefecimento veicular



Cavitação em válvulas



Distribuição de água em cidade





Cavitação em válvulas

Nível de ruído elevado, inclusive à noite, obriga moradores a pedir solução à empresa responsável.



Válvula antiga



Cavitação em válvulas



Válvula antiga substituída por uma válvula anti-ruído.



Válvula nova

Válvula nova, ruído antigo!

Dúvidas?

Obrigado.



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO