



Universidade Federal do Paraná
Setor de Tecnologia
Departamento de Hidráulica e Saneamento



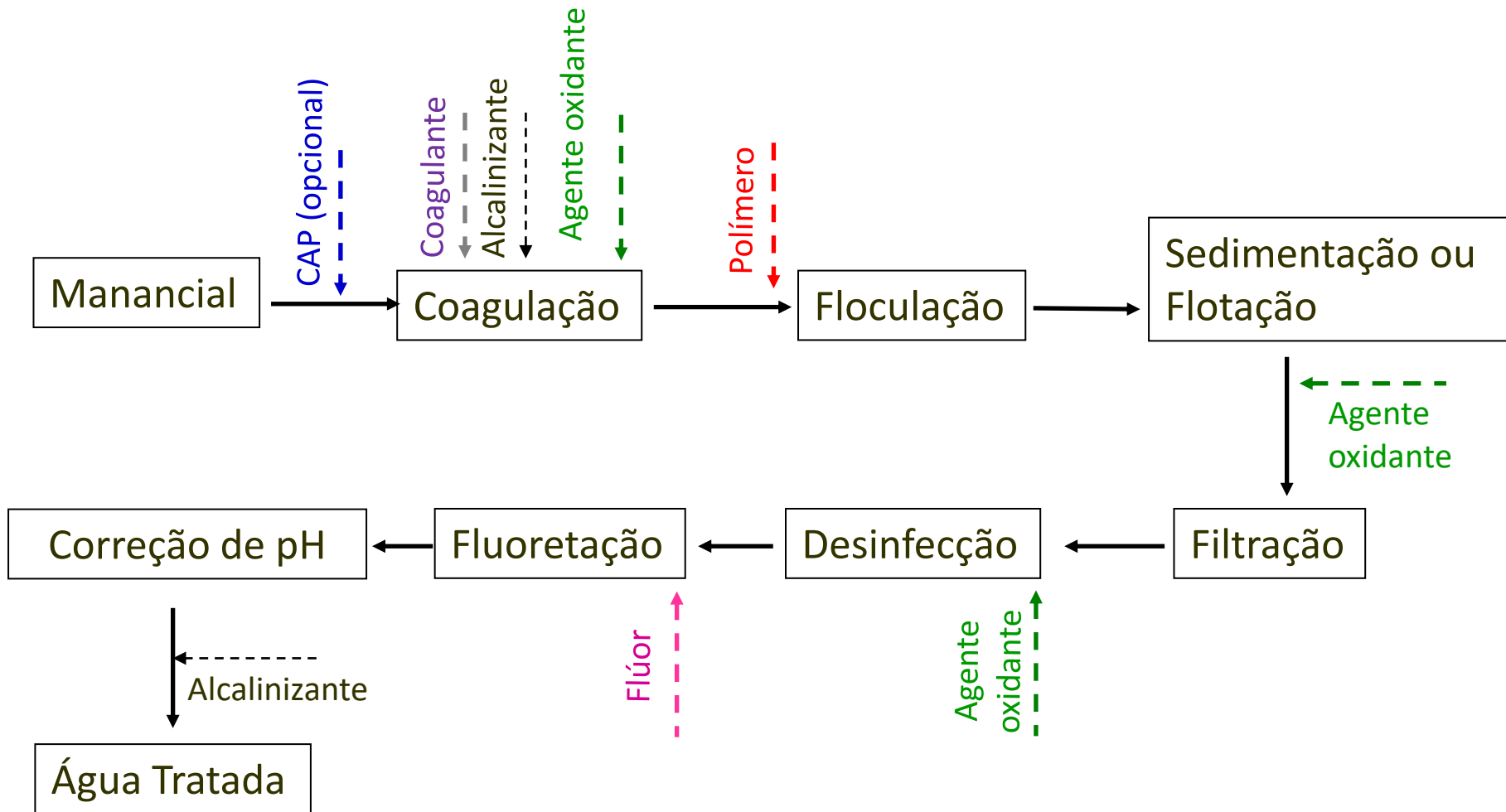
Tratamento de água

- Flotação

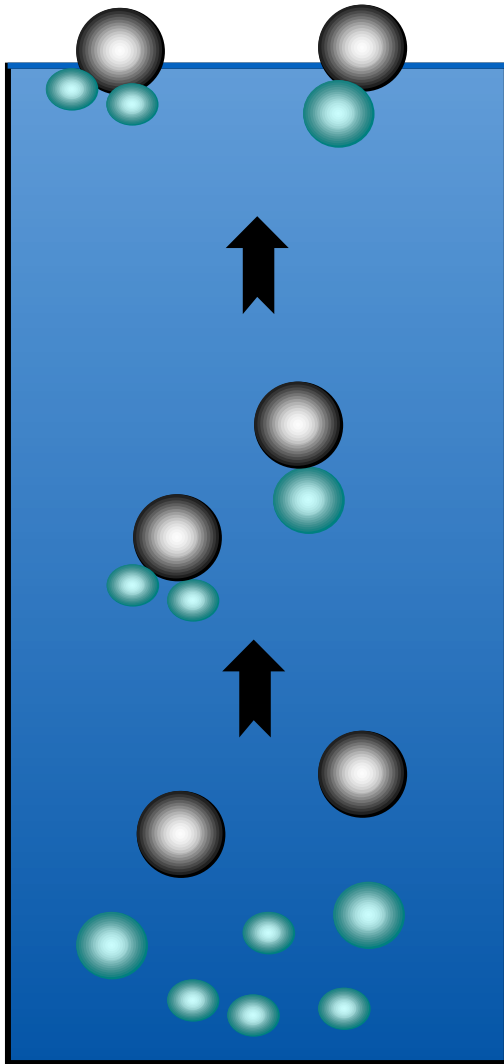
Prof. Ramiro Gonçalves Etchepare

E-mail: ramiro.etchepare@ufpr.br

FLUXOGRAMA DO TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA



No que consiste a flotação por ar dissolvido?



- Clarificação obtida por meio da produção de bolhas que se aderem aos flocos ou partículas em suspensão, reduzindo a sua massa específica e provocando a sua até a superfície de um tanque/flotador
- O sucesso do processo depende, entre outros, da geração de bolhas em quantidade e tamanhos adequados ao processo e da adesão das bolhas às partículas sólidas.
- Um outro fator tem relação ao equipamento utilizado e a parâmetros operacionais de processo.

 Partícula

 Bolha

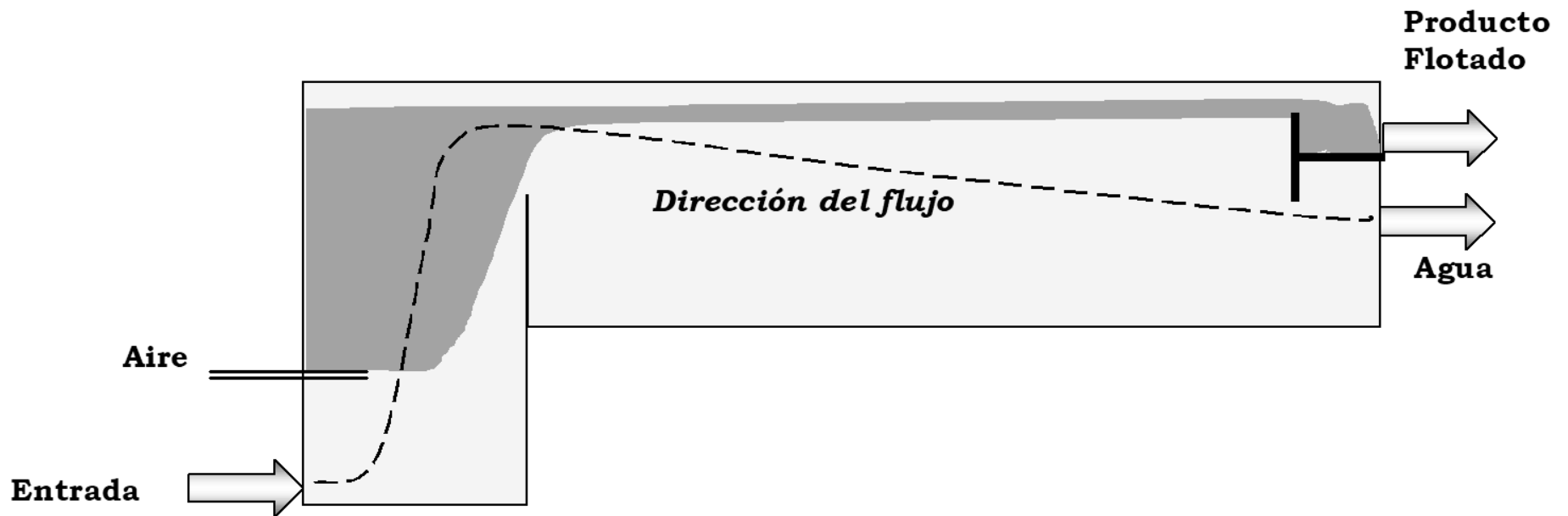
Histórico

- Final séc. XIX: Surgiu para a recuperação de minérios;
- 1924: Primeira geração. Células Sveen-Pedersen ($2-3\text{m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$);
- A partir de 1960: Tratamento de água para abastecimento (países escandinavos, África do Sul e Grã-Bretanha);
- Década de 90: ETA no Brasil.
- Crescente avanço > IWA International Conference on Flotation in Water and Wastewater Systems:
 - Helsinki (2000)
 - Seul (2007)
 - Nova Iorque (2012)
 - Toulouse (2016)

Histórico

Primeira geração (1924). Células Sveen-Pedersen

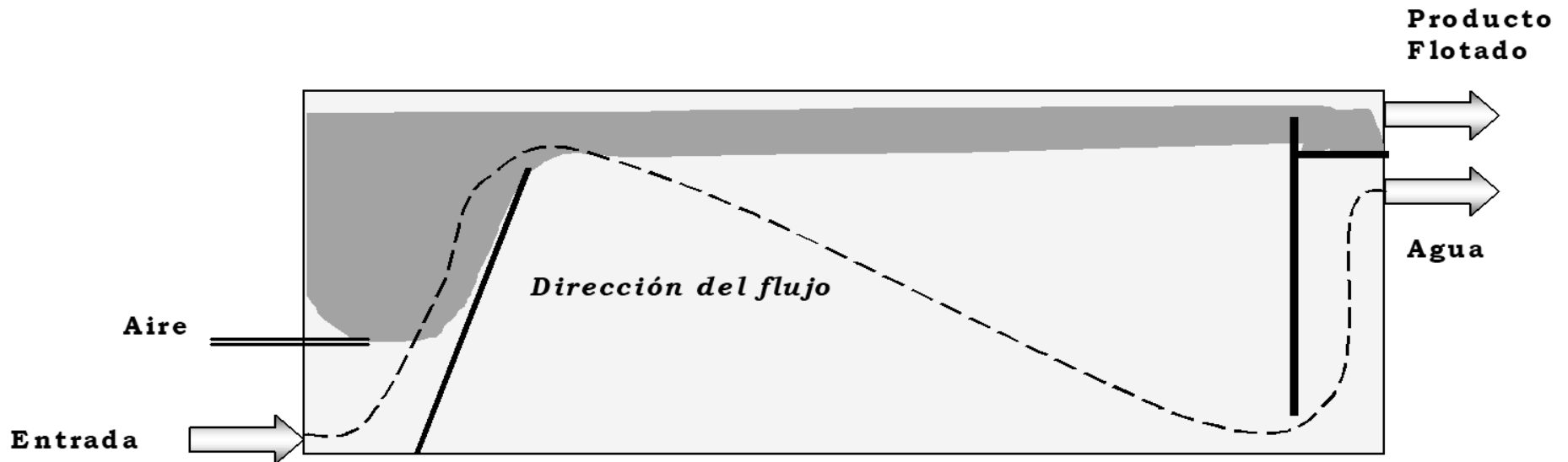
SISTEMA DE FAD SVEEN-PEDERSEN-1920
PRIMERA GENERACION-2-3 m/h



Histórico

- 1960. Segunda geração. Células mais profundas e com maiores taxas (5-7 m/h).

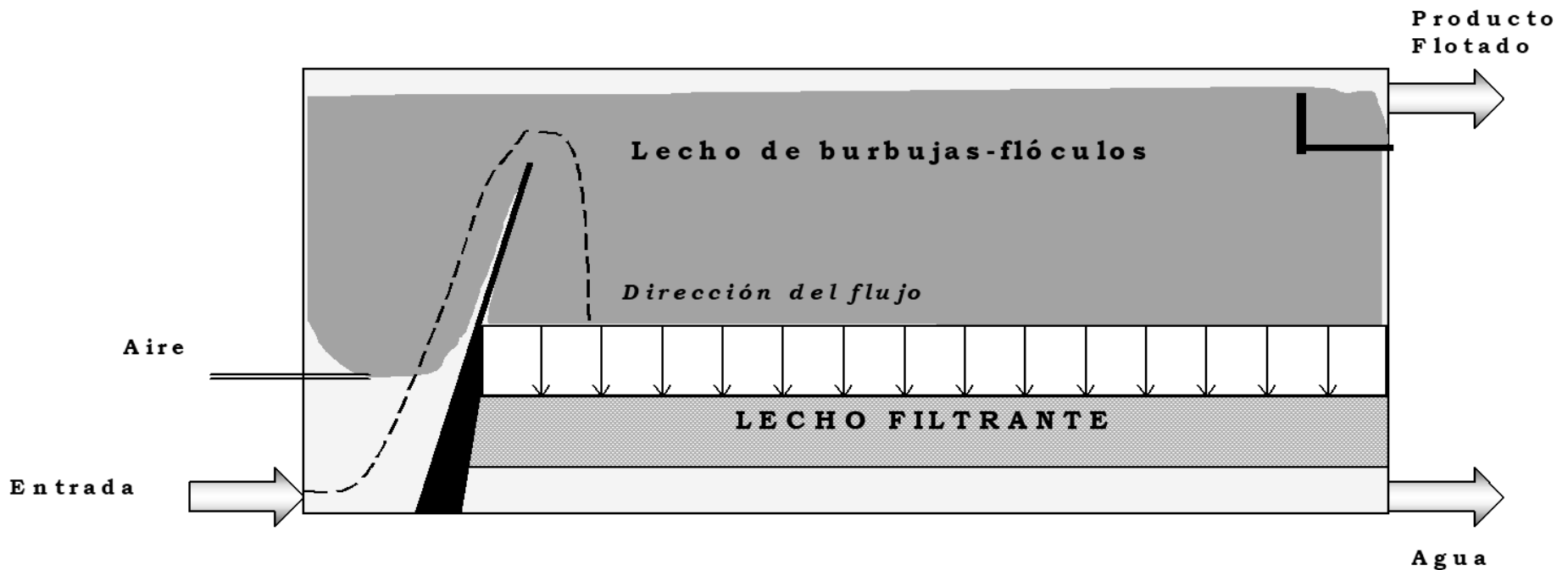
UNIDAD DE FAD CONVENCIONAL-1960-1970
SEGUNDA GENERACION-5-7 m/h



Histórico

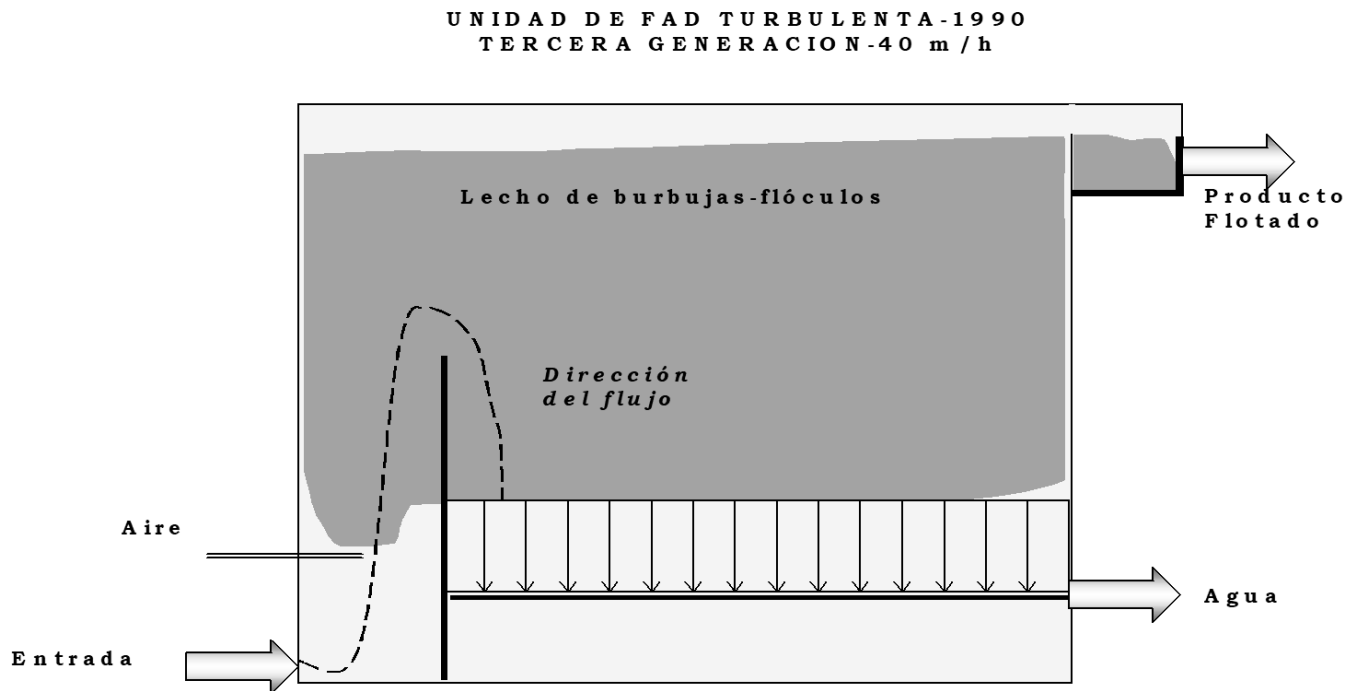
- 1970. Unidades FAD con filtros na parte inferior. Capacidade de 10-15 m/h.

UNIDAD DE FAD CON FILTRO-1970
10-15 m / h



Histórico

- Terceira geração (1990) - Unidades FAD turbulentas com capacidades de processamento de até 40 m/h. O filtro é substituído por condicionadores de fluxo.



Aplicações da Flotação

- ✓ Separação de minérios
- ✓ Clarificação de efluentes de papel e celulose
- ✓ Efluentes de refinaria
- ✓ Tratamento terciário de esgotos municipais
- ✓ Adensamento de lodos municipais e industriais
- ✓ Remoção de turbidez, cor, sólidos suspensos totais, além da remoção de cianobactérias

Flotação – Aplicações não convencionais

- Tratamento de águas de balneários, rios e lagos:

Unidade FAD	Aplicação	Vazão de tratamento, $m^3.h^{-1}$
Favela da Rocinha (RJ)	Piscina Artificial	1080
Rio Carioca (RJ)	Descontaminação de Rio	1080
Piscinão de Ramos (RJ)	Piscina Artificial	270
Parque do Ibirapuera (SP)	Descontaminação de Lago	540
Canal Pinheiros (SP)	Descontaminação de Rio	36000
Rio Negro (AM)	Descontaminação de Rio	25000

- Remoção de algas e materiais em suspensão - DBO, óleos e graxas e metais pesados.

Flotação – Vantagens reportadas

- Processo de alta taxa ($> 10 \text{ m.h}^{-1}$) de aplicação superficial (TAS) que resulta em unidades mais compactas
- Melhor remoção de algas
- Maior remoção de sólidos suspensos, particularmente dos sólidos finos
- Requer uma dosagem menor de reagentes (coagulantes)
- Reduz o volume de água descartado junto com o lodo
- Produz lodo com maior teor de sólidos
- Remoção de substâncias voláteis presentes na água bruta

Flotação – desvantagens reportadas

- Operação e manutenção mais complexas
- Exige operadores mais qualificados
- Os flotadores podem precisar de cobertura
- Requer equipamentos para a geração de bolhas
- Maior consumo de energia

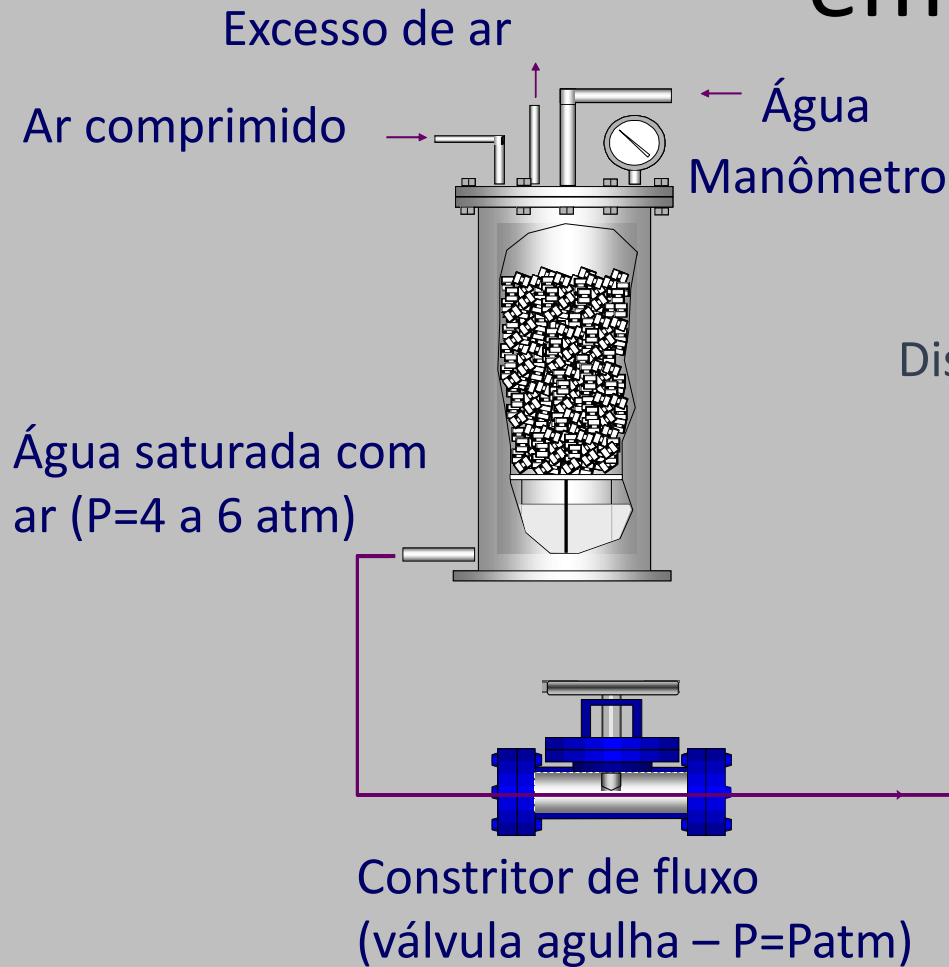
Tipos de Flotação

- Flotação por Ar Induzido (FAI) e Flotação por ar disperso
- Eletroflotação (EF)
- Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Flotação por ar dissolvido (FAD)

Saturação de ar em água

Borbulhamento de ar em vaso saturador



Dissolved air flotation
(DAF)



FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Cálculo teórico da saturação de ar em água (Lei de Henry):

- A saturação de um gás em um líquido é diretamente proporcional a pressão do gás acima do líquido para determinada temperatura.

$$P_a = K_{ar} \cdot X_a$$

Sendo:

P_a = Pressão parcial do soluto “a” na fase gasosa

X_a = Fração molar do soluto “a” na fase líquida

K_{ar} = constante da Lei de Henry (função da temperatura), atm/fração molar

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Cálculo da Fração molar do ar (X_{ar})

$P = 5 \text{ atm}$ (adotado)

$T = 20^\circ\text{C} \rightarrow K_{ar} \text{ tabelado} \rightarrow 6,64 \times 10^4 \text{ atm/mol}$

Tabela. Constante de Henry para diferentes gases ($K \times 10^4 \text{ atm/mol}$)

T ($^\circ\text{C}$)	Ar	CO ₂	CO	H ₂	H ₂ S	CH ₄	N ₂	O ₂
0	4,32	0,0728	3,52	2,79	0,0268	2,24	5,29	2,55
10	5,49	0,104	4,42	6,36	0,0367	2,97	6,68	3,27
20	6,64	0,142	5,36	6,83	0,0483	3,76	8,04	4,01
30	7,71	0,186	6,20	7,23	0,0609	4,49	9,24	4,75
40	8,70	0,233	6,96	7,51	0,0745	5,20	10,4	5,35
50	9,46	0,283	7,61	7,65	0,0884	5,77	11,3	5,88
60	10,1	0,341	8,21	7,65	0,1030	6,26	12,0	6,29

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Substituindo na equação, calcula-se a fração molar do ar (X_a):

$$P_a = K_{ar} \cdot X_a$$

$$5 \text{ atm} = 6,64 \times 10^4 \frac{\text{atm}}{\text{fração molar}} \cdot X_a$$

$$X_a = 7,53 \cdot 10^{-5}$$

$$X_a = \frac{n_{ar}}{n_{ar} + n_{H_2O}}$$

Qual o número de mols da água?

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Para 1 L de água...

1L de H₂O = 1000 g de H₂O

1 mol da molécula de H₂O tem 18 g de H₂O

1 mol --- 18 g
 n_{H_2O} --- 1000g

$$n_{H_2O} = \frac{1000 \text{ g}}{18 \text{ g/mol}} = 55,6 \text{ mols}$$

$$X_a = \frac{n_{ar}}{n_{ar} + n_{H_2O}}$$

$$7,53 \times 10^{-5} = \frac{n_{ar}}{n_{ar} + 55,6}$$

$$n_{ar} = 4,19 \times 10^{-3} \text{ mols}$$

$$n_{ar} = 0,00419 \text{ mols}$$

Fração molar do ar para a condição atmosférica = ~0,0093 mol

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Cálculo do volume da saturação: lei dos gases ideais

$$P \times V = n_{ar} \times R \times T$$

Onde:

P = pressão (atm) → P=5 atm

V = volume de saturação do ar na água = S_{ar}

R = constante dos gases ideais = 0,082 L.atm/K.mol

T= temperatura em Kelvin (K) → T=20°C ou 293 K

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Logo,

$$V = \frac{n_{ar} \times R \times T}{P}$$

$$V = \frac{4,19 \times 10^{-3} \times 0,082 \times 293}{5}$$

$$V = 0,0201 L_{ar} / L_{H_2O} \Rightarrow V = 20,1 mL_{ar} / L_{H_2O}$$

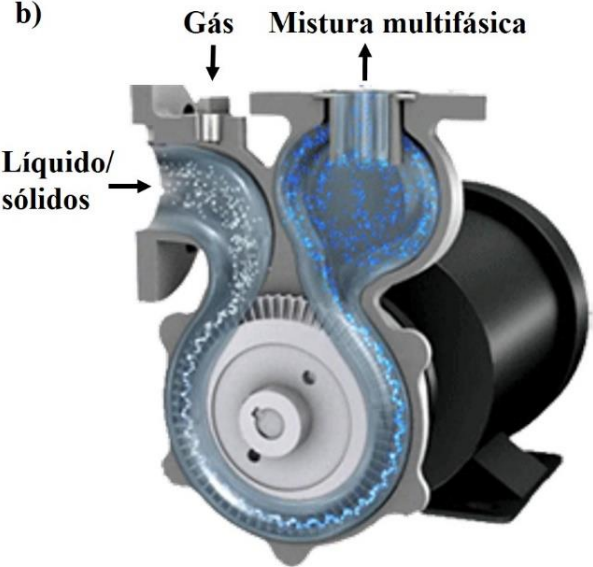
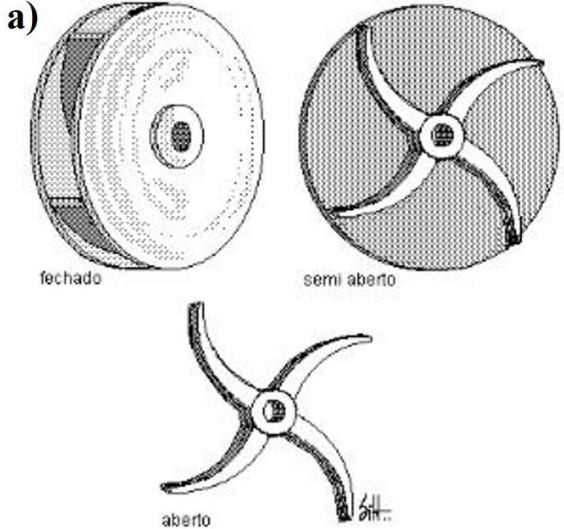
ETA Iraí (Curitiba)

Vaso saturador de
leito fixo

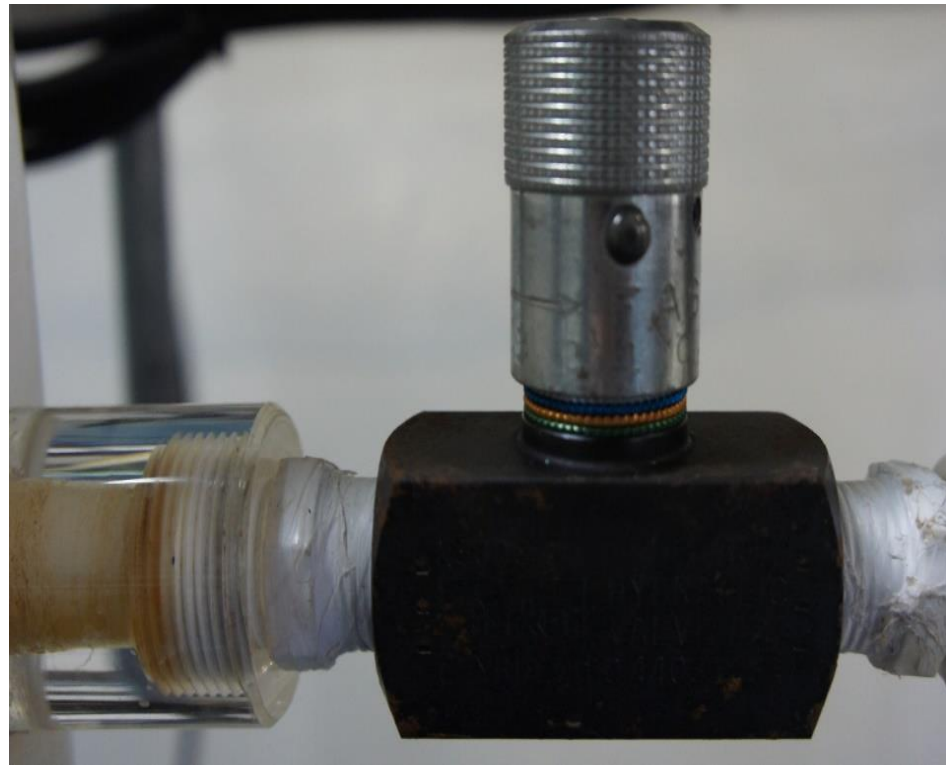
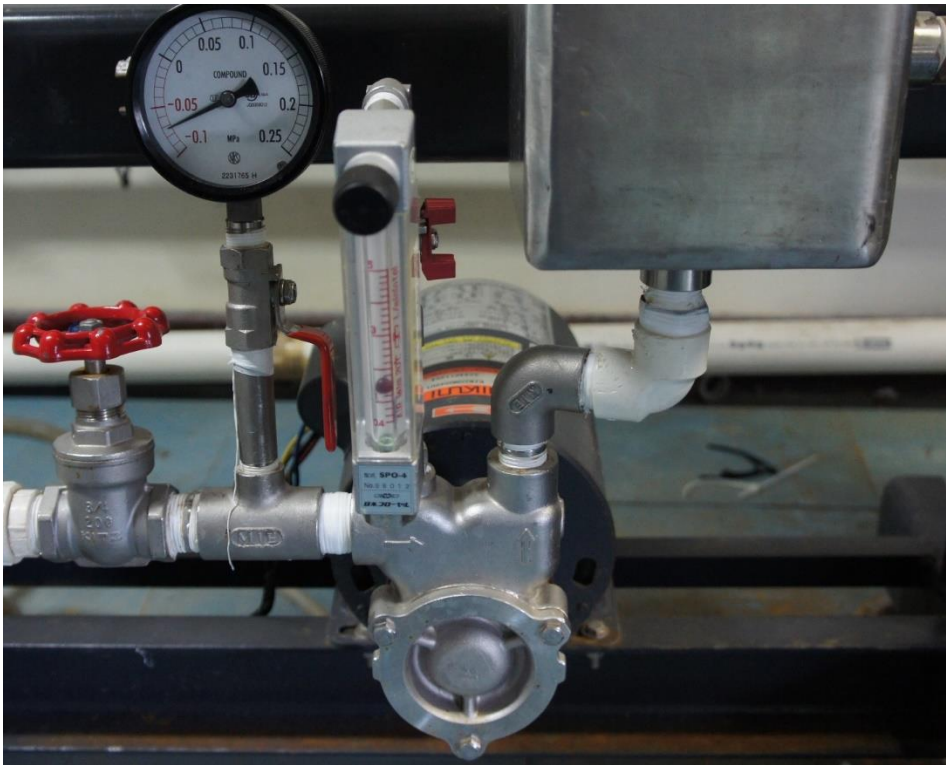


Saturação de ar em água

Injeção de ar com bombas centrífugas multifásicas



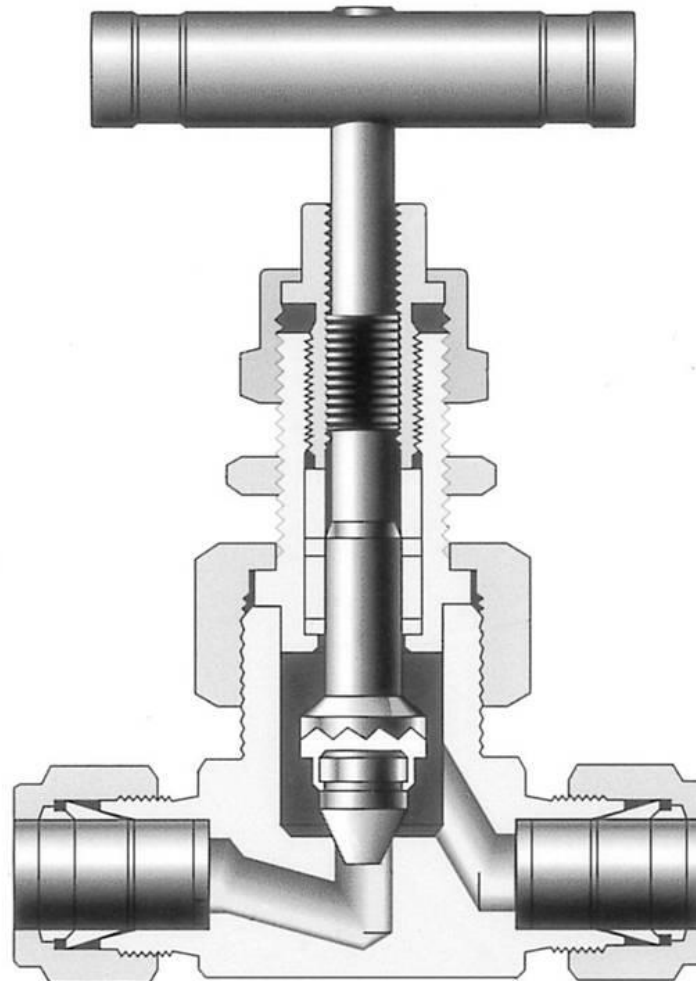
Bomba marca Nikuni®



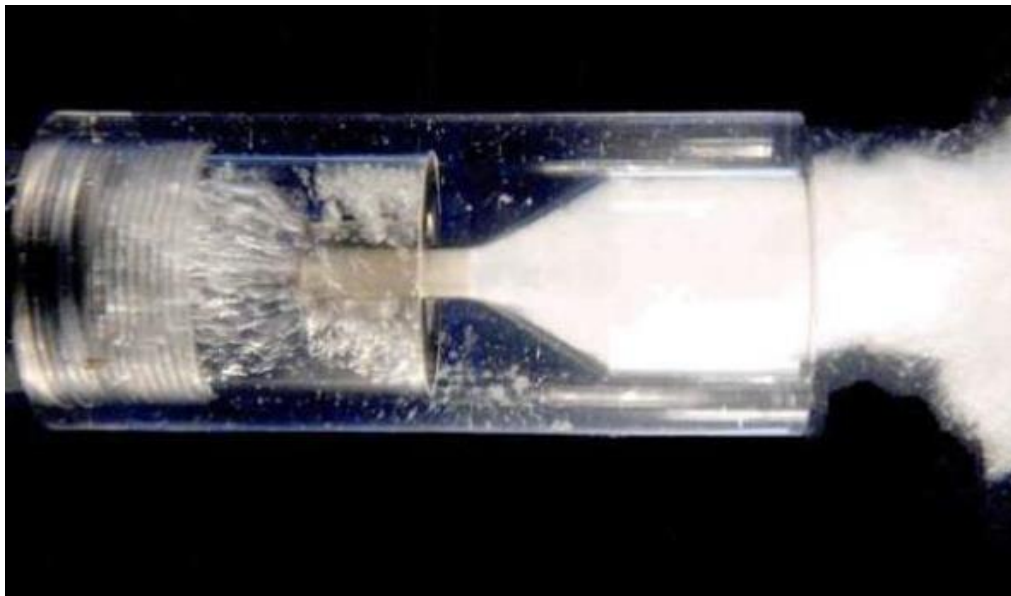
Dispositivos de cavitação hidrodinâmica



Válvula de agulha



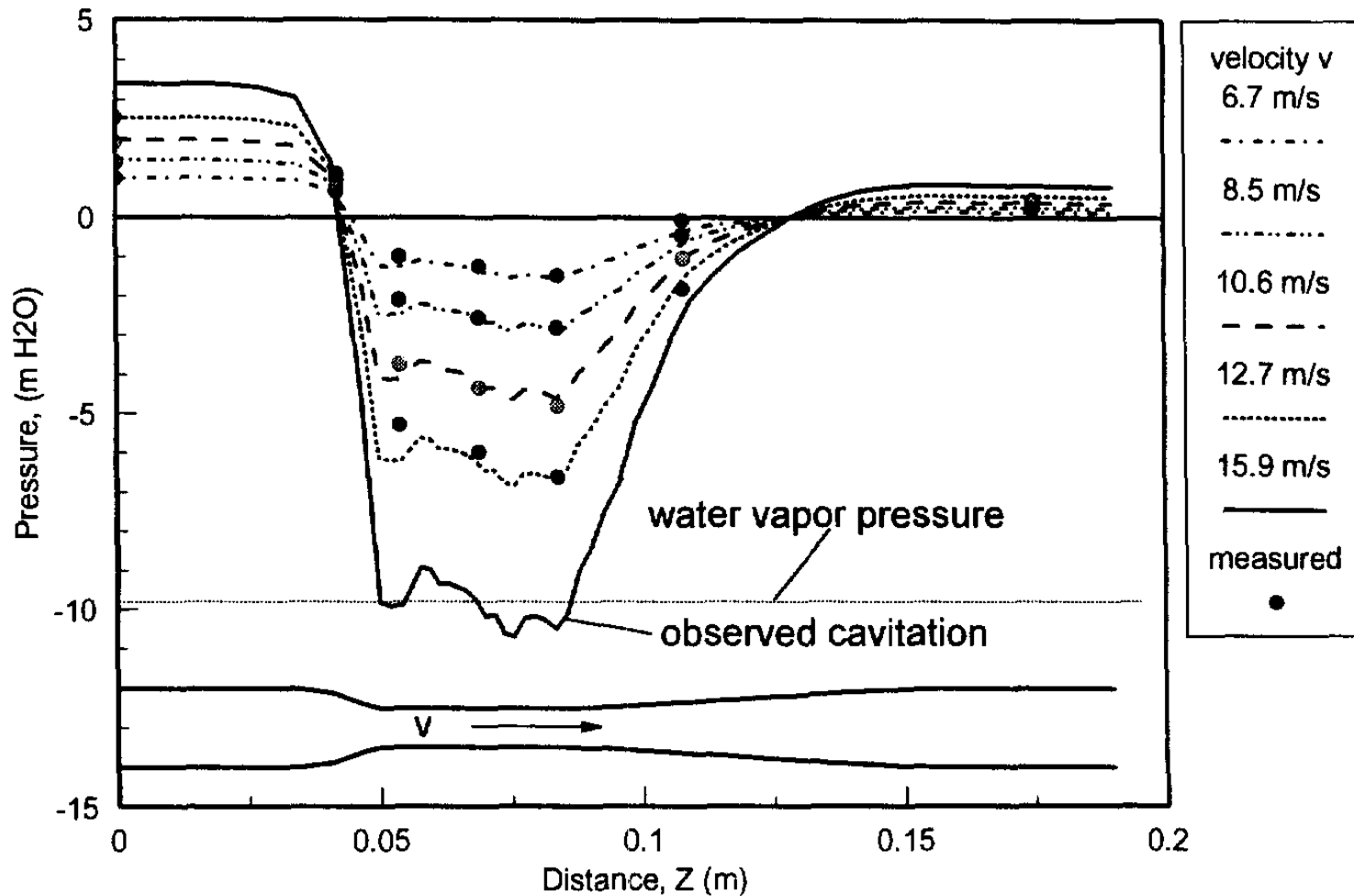
Dispositivos de cavitação hidrodinâmica



Tubo de cavitação – tipo Venturi



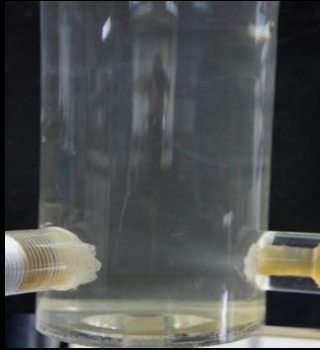
Formação de bolhas: despressurização e cavitação hidrodinâmica



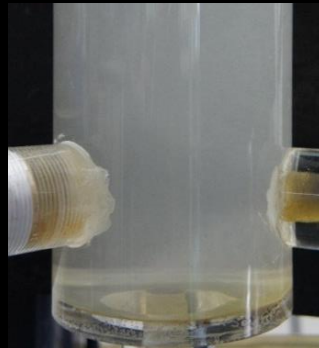
Microbolhas (MBs): 10-70 μm
Nanobolhas (NBs): 50-500 nm

Geração de bolhas com bomba multifásica / escala semi-piloto

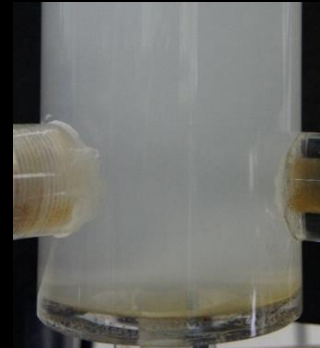
1,5 bar



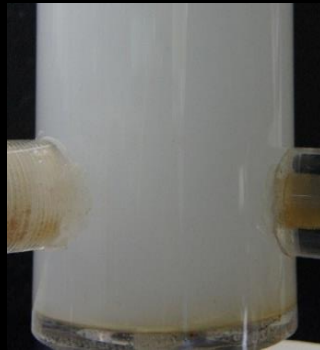
2,5 bar



3 bar



4 bar



5 bar

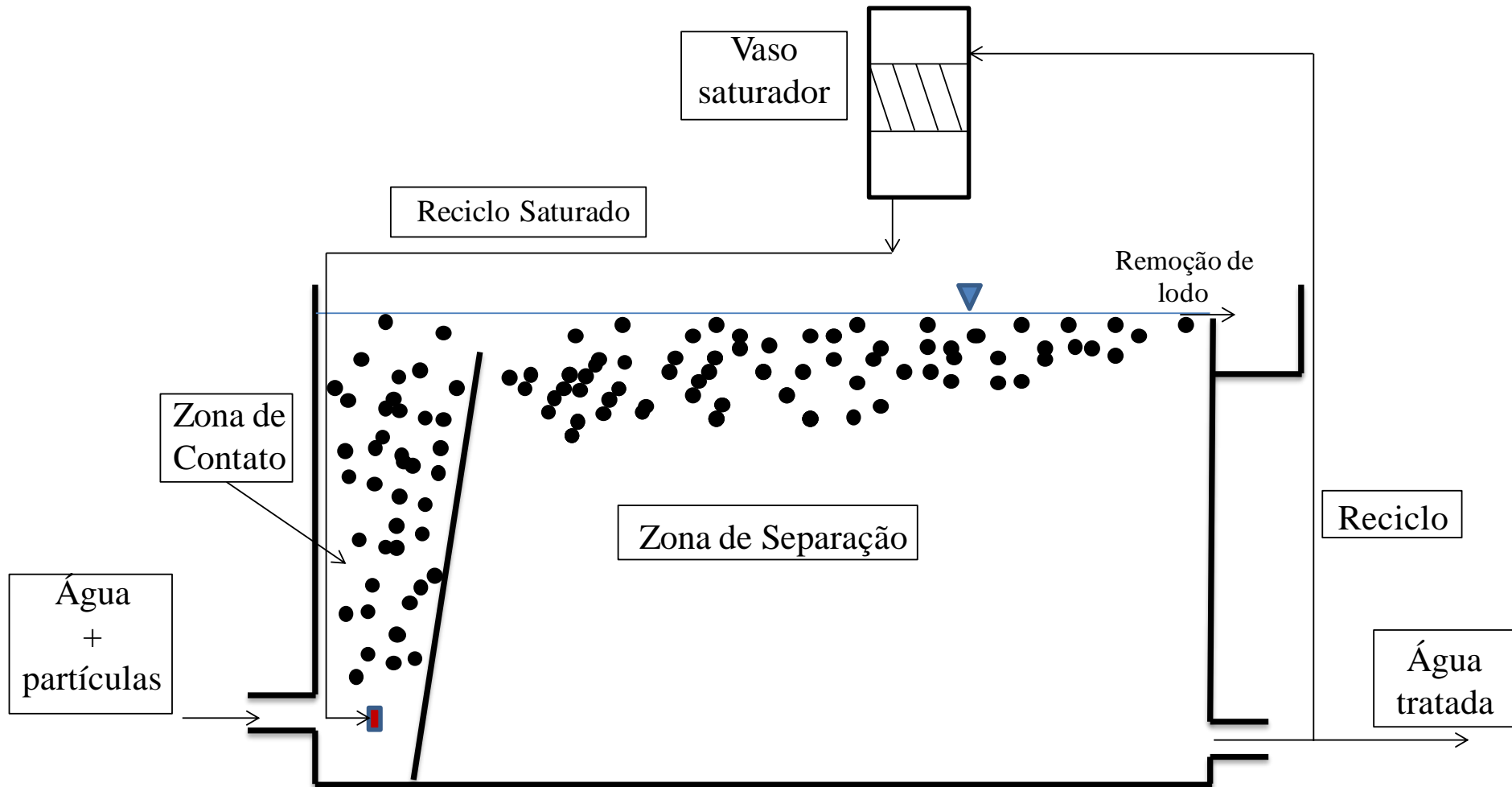


2,5 bar / $T_{sup} = 50 \text{ mN.m}^{-1}$

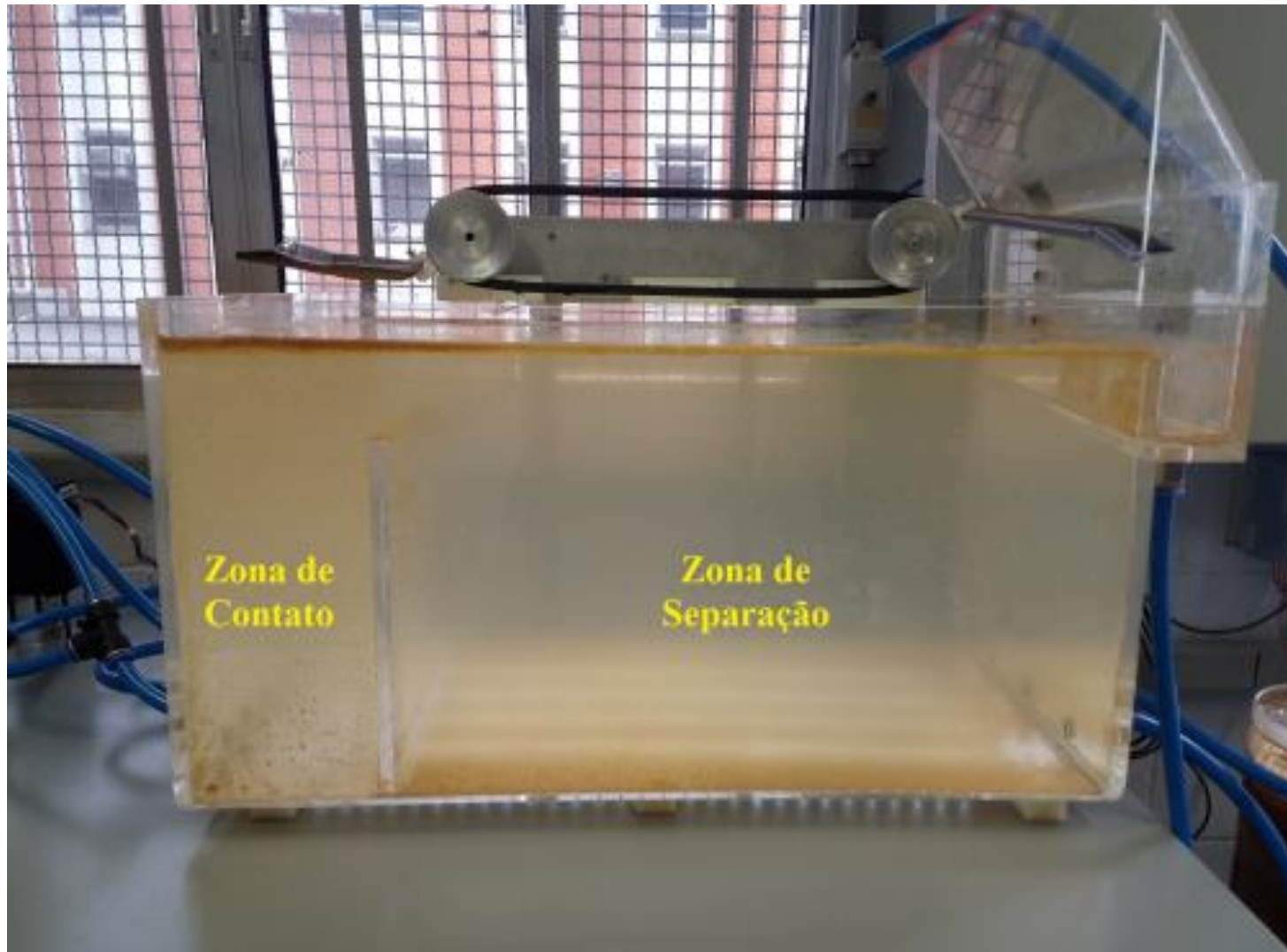


Flotação com Ar Dissolvido - FAD

- Célula de flotação utilizando vaso saturador – sistema convencional

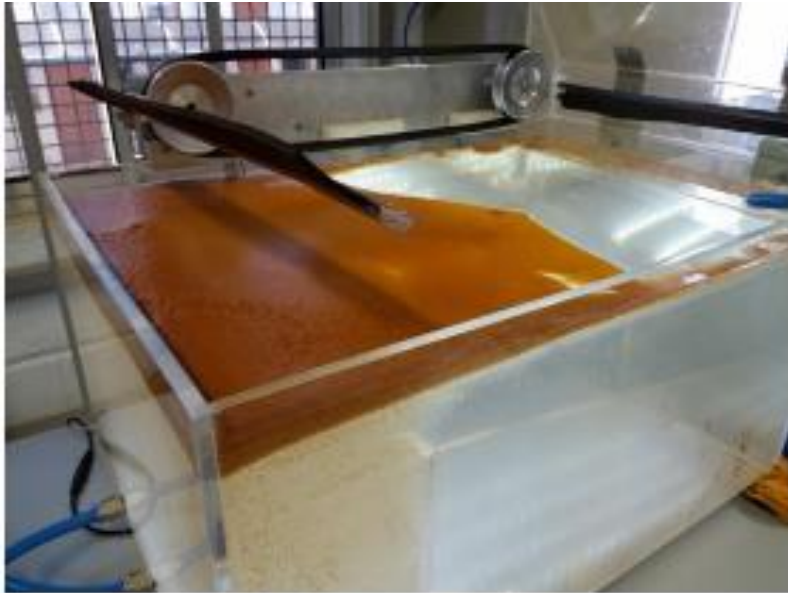


Flotador piloto/bancada

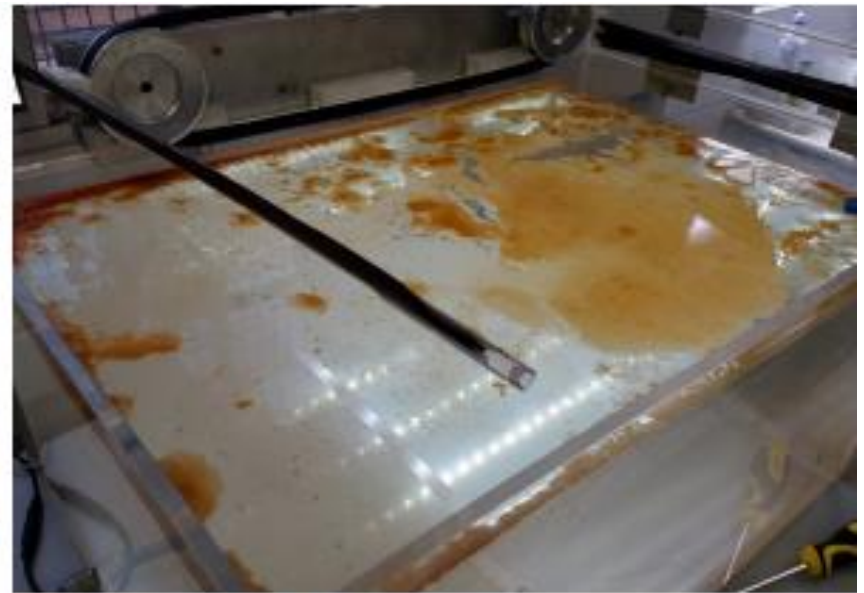


Flotador piloto/bancada

- Remoção de lodo (vista superior)



(a) Antes da remoção.



(b) Depois da remoção.

Parâmetros de projeto

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \times S_{ar} \times (f \times P - 1) \times Q_R}{SST \times Q}$$

- A/S é a relação ar-sólido em $\text{mg} \cdot \text{mg}^{-1}$;
 - S_{ar} é a solubilidade do ar, em $\text{mL} \cdot \text{L}^{-1}$;
 - f é a fração de gás dissolvido a uma dada pressão, usualmente 0,5 a 1,0;
 - P é a pressão absoluta em atmosferas;
 - SST é a concentração de sólidos em suspensão totais em $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$;
 - Q é a vazão em $\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$;
 - Q_R é a taxa de recirculação.
-
- **A relação ar/sólidos recomendada é de 0,005 a 0,016 mg de ar por mg de SST**

Parâmetros de projeto

- Taxa de recirculação de água saturada: 5 a 15%
- Tempo de detenção hidráulico: 15 a 35 min
- Altura do flotador: 1,5 - 2 m
- Taxa de aplicação superficial: 120 a 360 m³/m².dia
- Comprimento: < 12 m
- Relação entre comprimento e largura (L/B): 1 a 1,5
- Vazão máxima por unidade de flotação: 600 L/s

Exercício

Calcular a área, volume, TDH e dimensões de 4 flotadores (compartimentos) em paralelo para uma ETA considerando os seguintes dados:

- População: 200.000 hab
- Per-capita: 200 L/hab.d
- Coeficiente relativo ao dia de maior consumo: 1,2
- Coeficiente relativo a hora de maior consumo: 1,5
- Uso da ETA = 4%
- Taxa de reciclo ao saturador = 10%
- Altura do flotador = 1,5 m
- Relação comprimento/largura (L/B): 1
- Taxa de Aplicação Superficial (TAS) = $140 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$

Exercício

Vazão de projeto:

$$Q = \frac{P \times q \times K_1}{86400} + usoETA$$

$$Q = 0,577 \text{ m}^3/\text{s}$$

Área do tanque de flotação:

$$A_{flotador} = \frac{Q_{afluente} + Q_{recirculação}}{TAS}$$

$$A = 392,2 \text{ m}^2$$

$$Ac = 98,06 \text{ m}^2$$

Dimensões:

$$B = 9,90 \text{ m}$$
$$\sim 10 \text{ m}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

Exercício

Nova área e TAS

Área do tanque de flotação:

$$A_{flotador} = \frac{Q_{afluente} + Q_{recirculação}}{TAS}$$

$$A = 400 \text{ m}^2$$

$$A_c = 100 \text{ m}^2$$

$$TAS = 137 \text{ m}^2$$

Exercício

Volume do flotorador:

$$V_{C \text{ flotorador}} = A_{C \text{ flotado}} \times H$$

$$V_C = 150 \text{ m}^3$$

Tempo de detenção hidráulico:

$$V_{\text{flotorador}} = Q_{\text{flotorador}} \times t_{\text{detenção}}$$

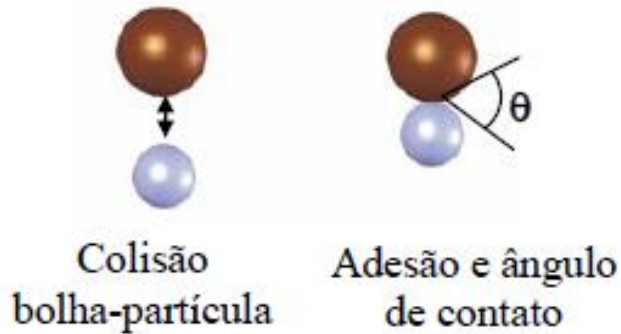
$$t_d = \frac{V_{C \text{ flotorador}}}{Q_{C \text{ flotorador}} + Q_{R_C}}$$

$$td = 944 \text{ s}$$

Mecanismos de flotação

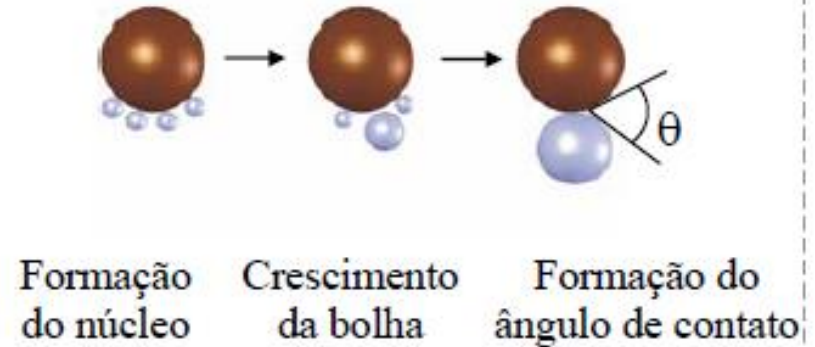
Colisão e Adesão

(a)



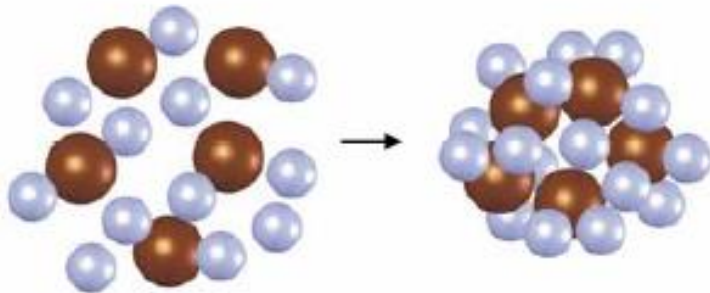
Formação de bolhas na superfície das partículas

(b)



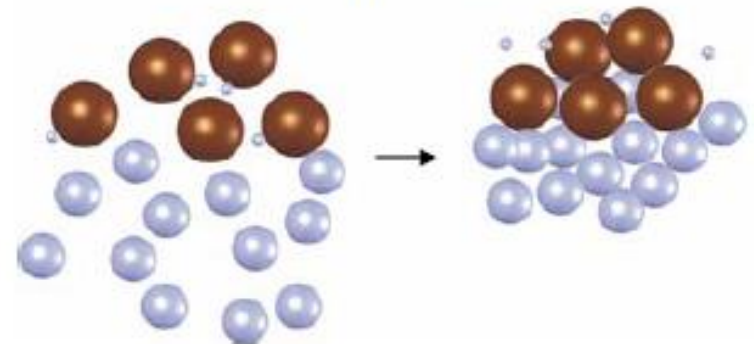
Aprisionamento de bolhas em flocos

(c)



Captura ou arraste de sólidos por bolhas

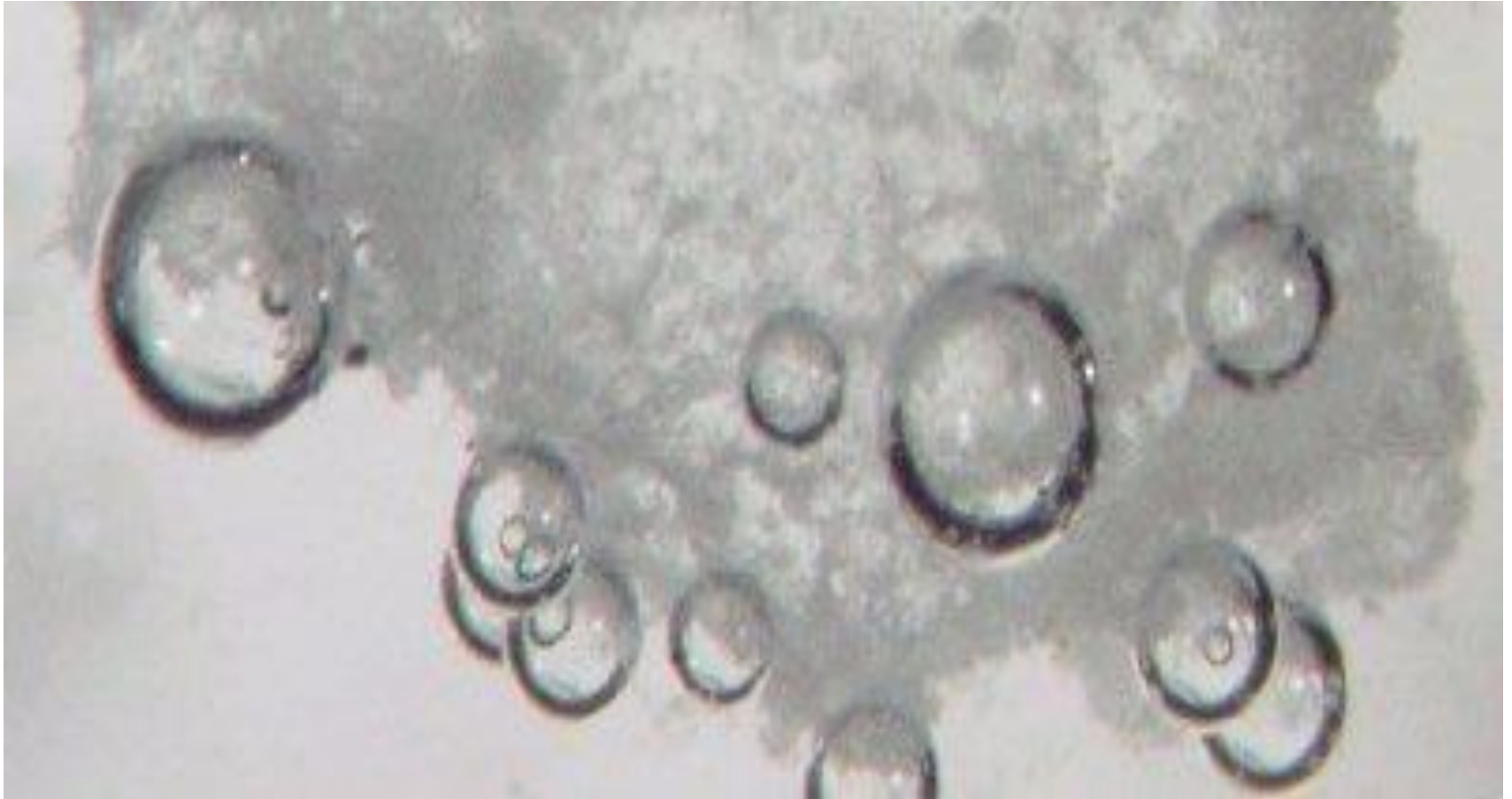
(d)



● partículas ● bolhas de ar



Aprisionamento de bolhas no interior de precipitados/flocos



Arraste de flocos/partículas por
bolhas



Efluente bruto



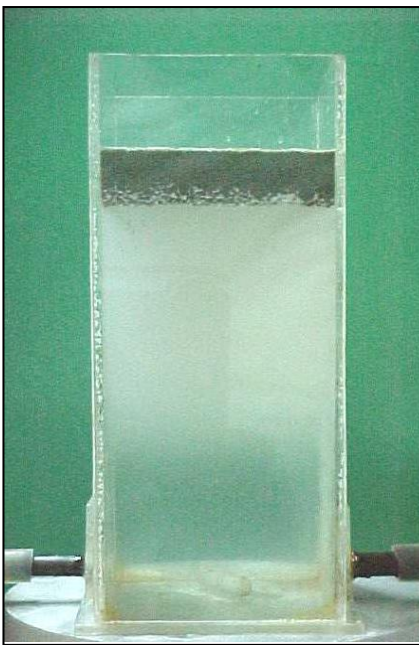
Efluente floculado



Flotação inicial



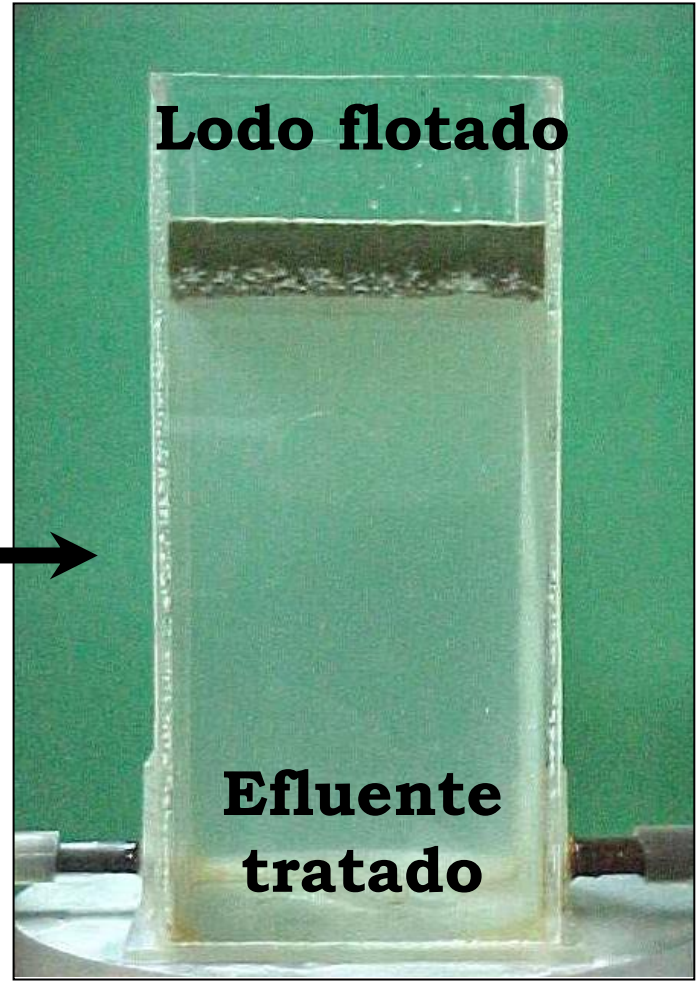
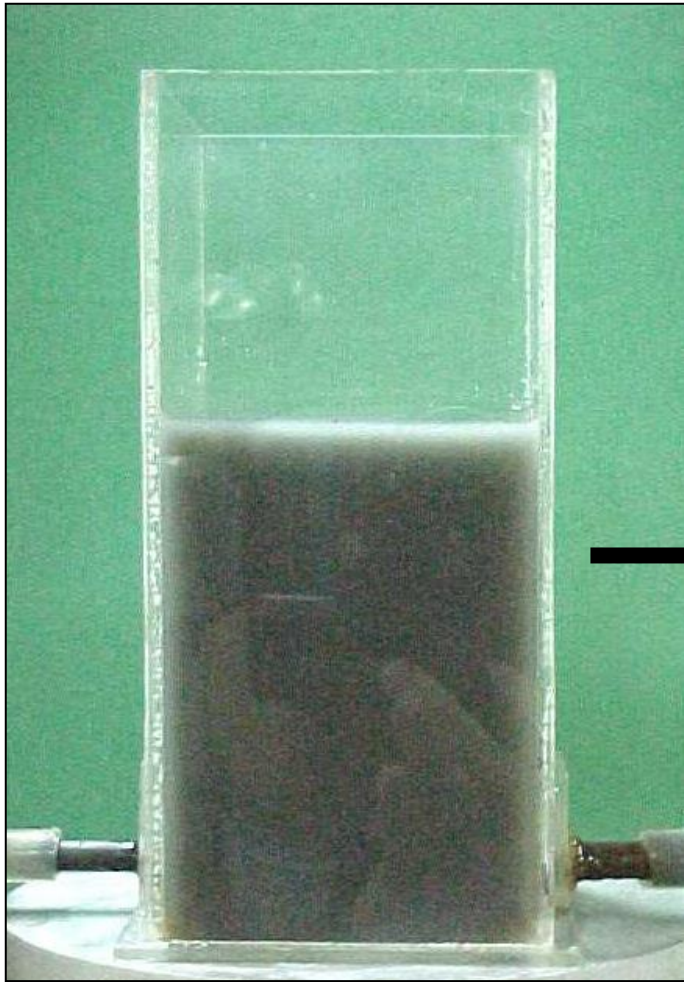
Flotação: 15s



Flotação: 1min



Flotação: 4min



FAD no tratamento de águas: Contexto Nacional

- 1994 – Primeira aplicação de FAD para tratamento de água foi a ETA Meaípe, no Espírito Santo, que opera desde 1994
- ETAs de pequeno porte (unidades compactas)
 - ETA Mantenópolis – ES (34 L.s⁻¹)
 - ETA Mairiporã – SP (28 L.s⁻¹)
- ETAs de grande porte (grandes centros urbanos)
 - ETA Iraí - Curitiba (Sanepar) – 2850 L.s⁻¹
 - ETA Brasília (Caesb) – 3.500 L.s⁻¹
 - ETA Rio Pequeno (São José dos Pinhais-PR) e ETA Manaus II



ETA Iraí (Curitiba) – Sanepar



Flotador - Camada de Lodo flotado

ETA Iraí (Curitiba) – Sanepar



Flotador vazio e em processo de enchimento





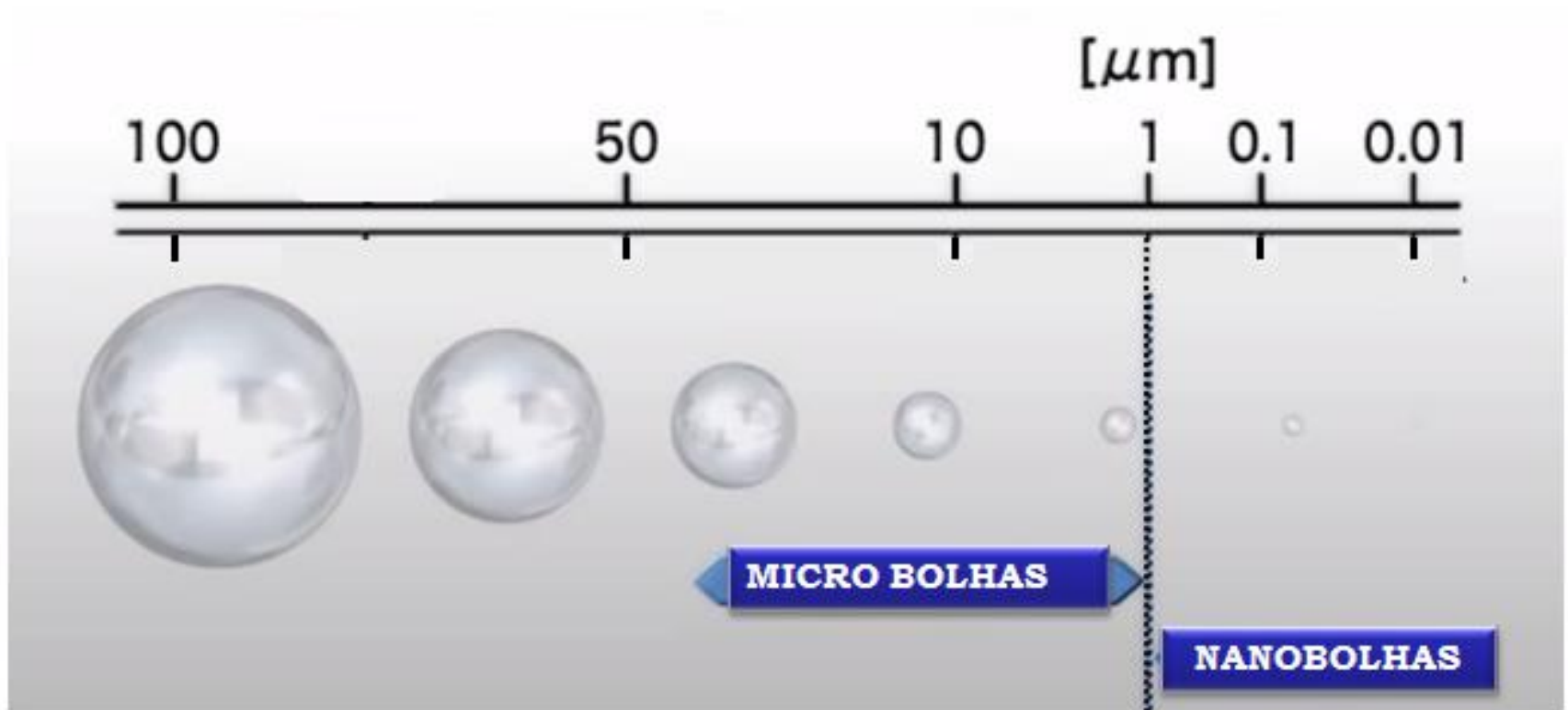


Unidade de flotação da
ETA Mairiporã da Sabesp

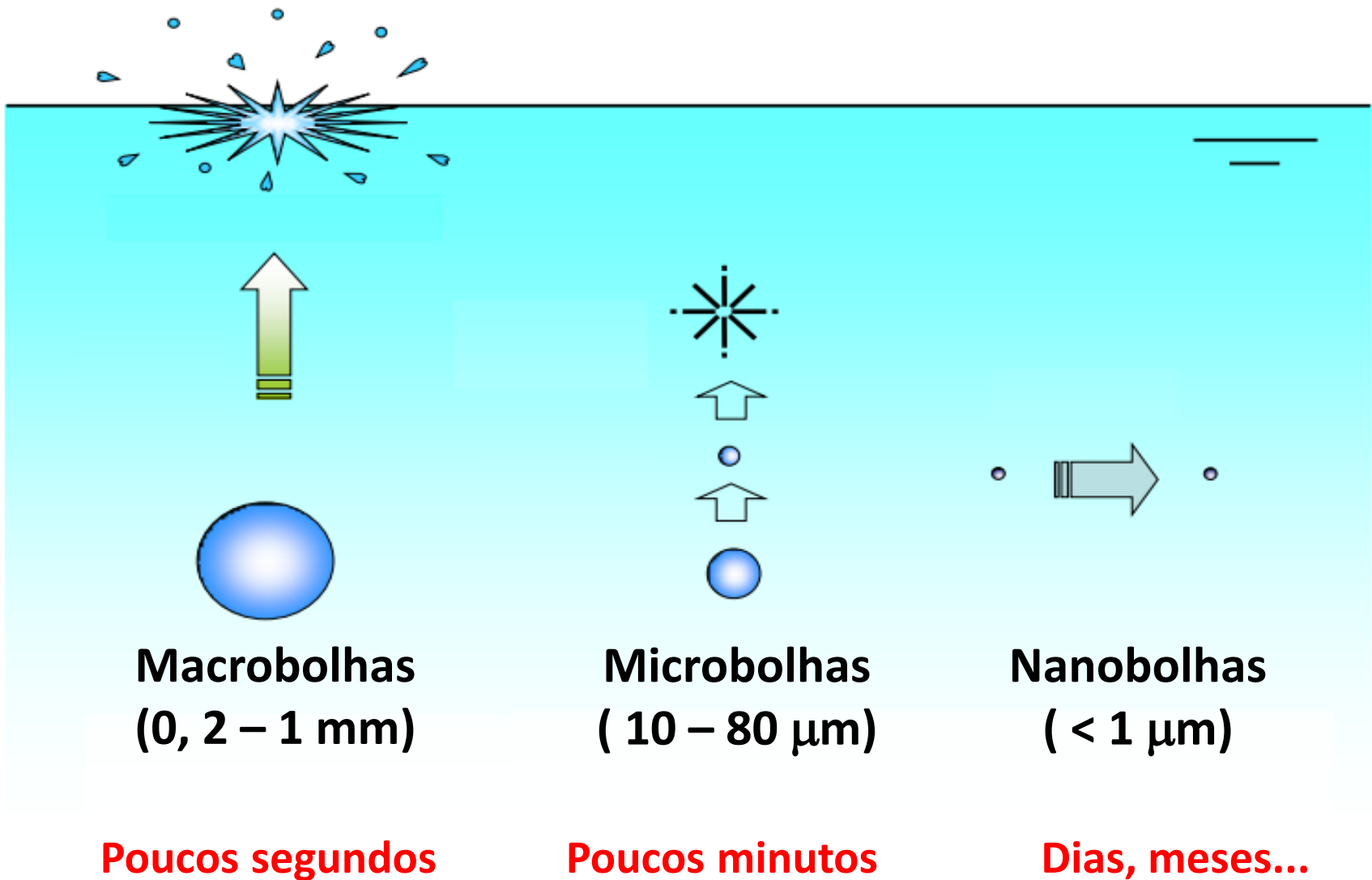
Descoberta recente na flotação por ar
dissolvido (últimos 5 anos):
Nanobolhas

Laboratório de Tecnologia Mineral e
Ambiental da UFRGS

O que são Nanobolhas?



Tempo de vida de bolhas

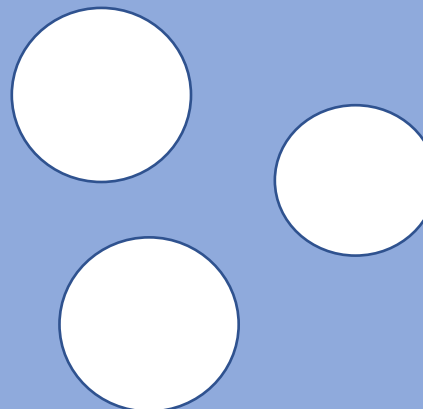


Líquido

Nanobolhas dispersas



100 nm



Nanobolhas de superfície

Nanopancake





Aqueous dispersions of nanobubbles: Generation, properties and features



A. Azevedo, R. Etchepare, S. Calgaroto, J. Rubio *

NBs com corante azul de metileno

D32 = 780 nm

10 μm

NBs sobre uma superfície hidrofóbica

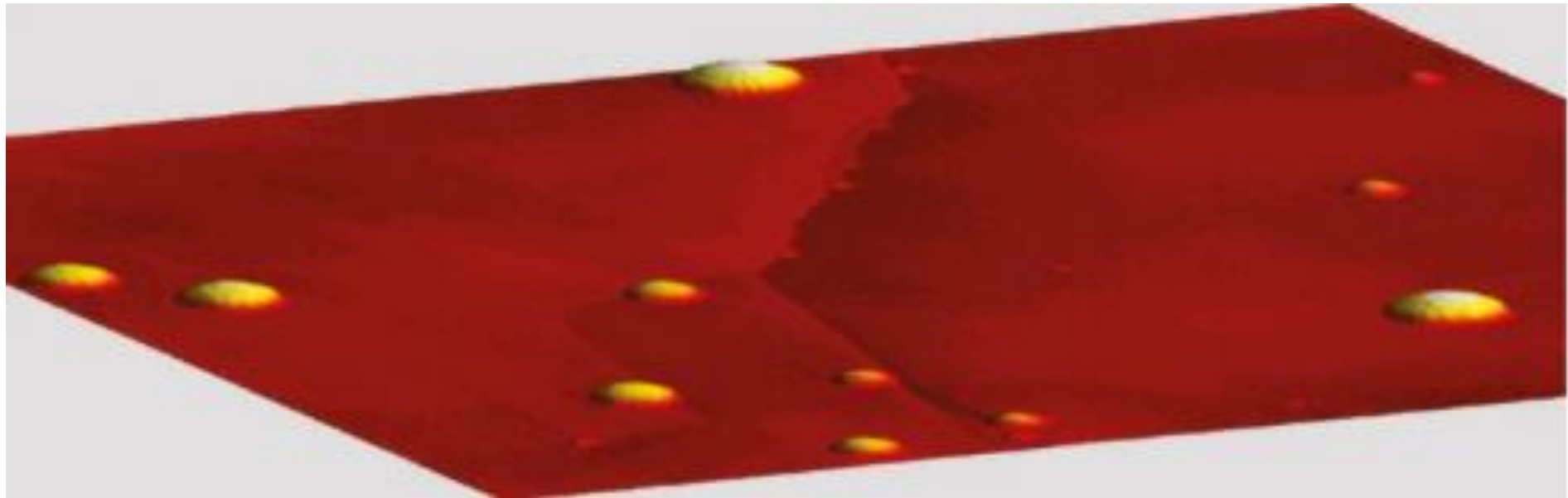
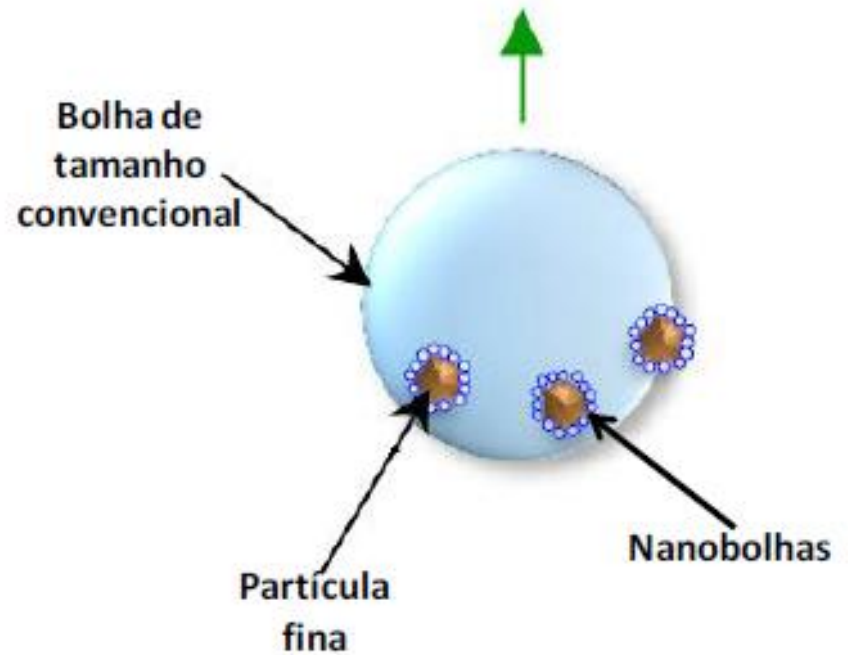
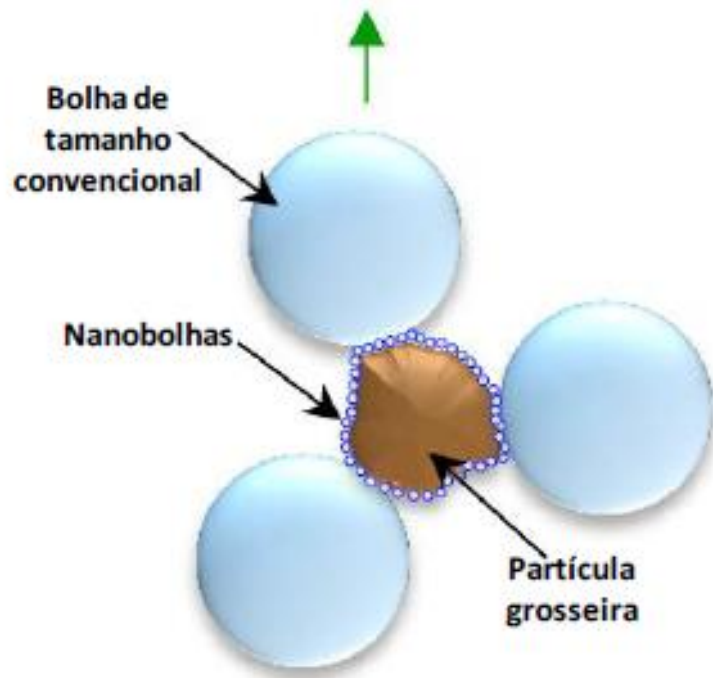


Imagem de AFM

(Fonte: Borkent et al., 2010)

Contribuição das NBs na adesão de bolhas maiores



Fonte: Pourkarimi et al. (2017)

A

Fe(OH)₃

Fe(OH)₃

Líquido

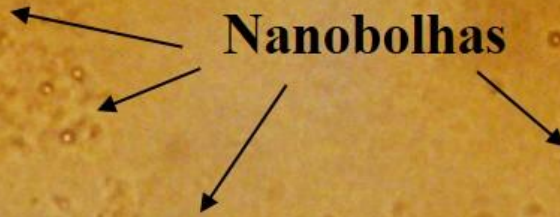
10 μm



B

Fe(OH)₃

Nanobolhas



Líquido



Contents lists available at ScienceDirect

Separation and Purification Technology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/seppur



Removal of ferric hydroxide by flotation with micro and nanobubbles

R. Etchepare¹, A. Azevedo, S. Calgaroto, J. Rubio*



10 μm

Bibliografia

- Edzwald, J. & Haarhoff, J. (2011) Dissolved Air Flotation for Water Clarification, 1st edn. American Water Works Association and McGraw Hill, Denver, CO, USA.
- Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil, Abastecimento Urbano de Água. Panorama Nacional. V. 1. ANA, Brasília, 2010.
- Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil, Abastecimento Urbano de Água. Panorama por Estados. V. 2. ANA, Brasília, 2010.
- Azevedo, A.. Estudos de flotação por ar dissolvido com bomba multifásica (FAD-B) e sedimentação lamelar (SL) no tratamento de água bruta para abastecimento público (Canoas-RS). Dissertação de mestrado (UFGRS), 2013.
- Azevedo, A. ; Etchepare, R. ; Rubio, J Raw water clarification by flotation with micro and nanobubbles generated with a multiphase pump. WATER SCIENCE AND TECHNOLOGY , v. 113, 2017