



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



Tratamento de água

- Coagulação/floculação

Prof. Ramiro Gonçalves Etchepare

E-mail: ramiro.etchepare@ufpr.br

Concepção de ETAs: Evolução histórica

- Processo de tratamento de água: conjunto de manipulações da água, de modo que esta possa ser considerada apta para abastecimento público
- ETAs atuais: resultado do conjunto de desenvolvimentos empíricos e científicos que ocorreram ao longo do tempo e que deverão fazer parte do nosso futuro.





Fonte: Seckler Filho, 2017

1500 a.C. – Artefato egípcio confeccionado para a separação de sólidos

Concepção clássica de ETAs convencionais

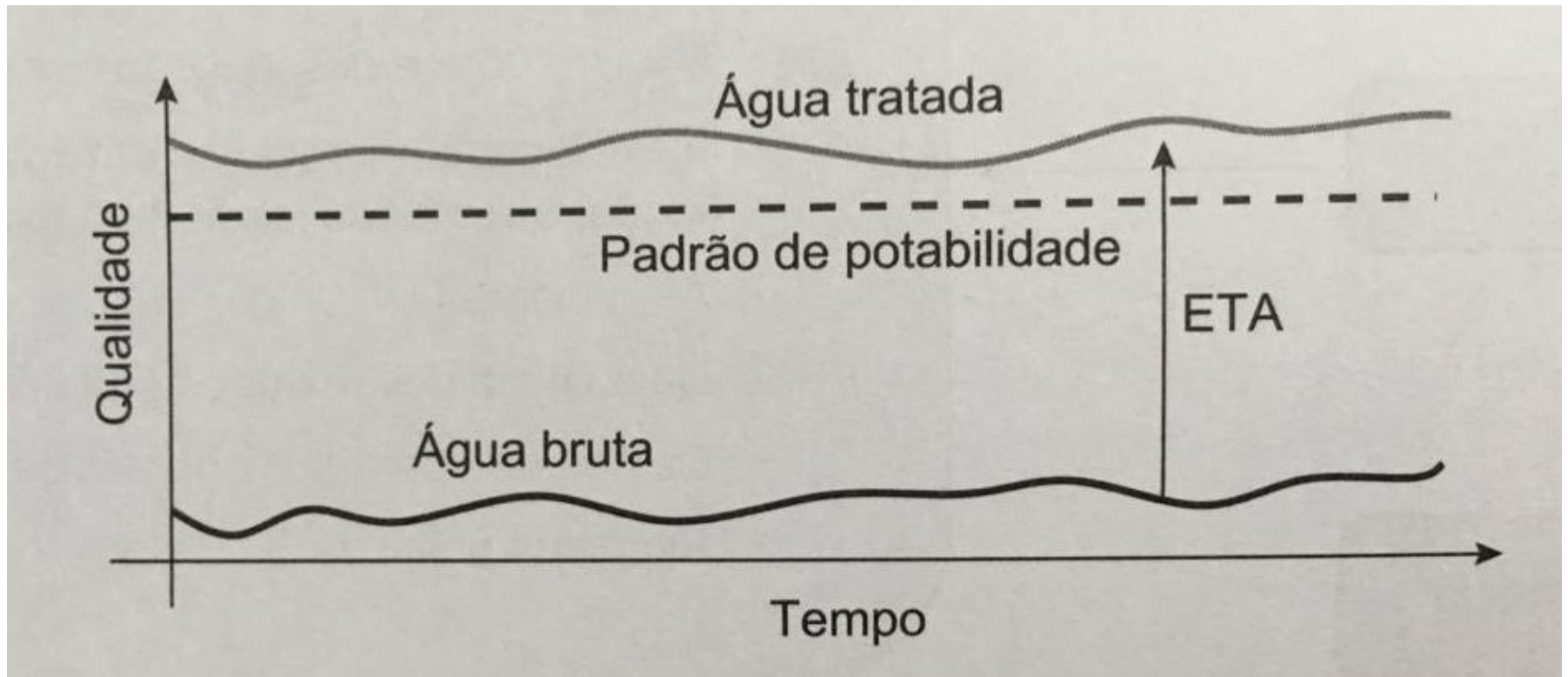
```
graph LR; A[Coagulação  
Floculação  
Sedimentação] --> B[Filtração  
rápida]; B --> C[Desinfecção];
```

Coagulação
Floculação
Sedimentação

Filtração
rápida

Desinfecção

Finalidade de uma ETA como parte de um sistema de abastecimento de água



Perguntinha: Quais os usos de água de um sistema de abastecimento que realmente requerem um padrão de potabilidade fora o consumo humano?

Quais os usos de um sistema de abastecimento que realmente requerem um padrão de potabilidade fora o consumo humano?

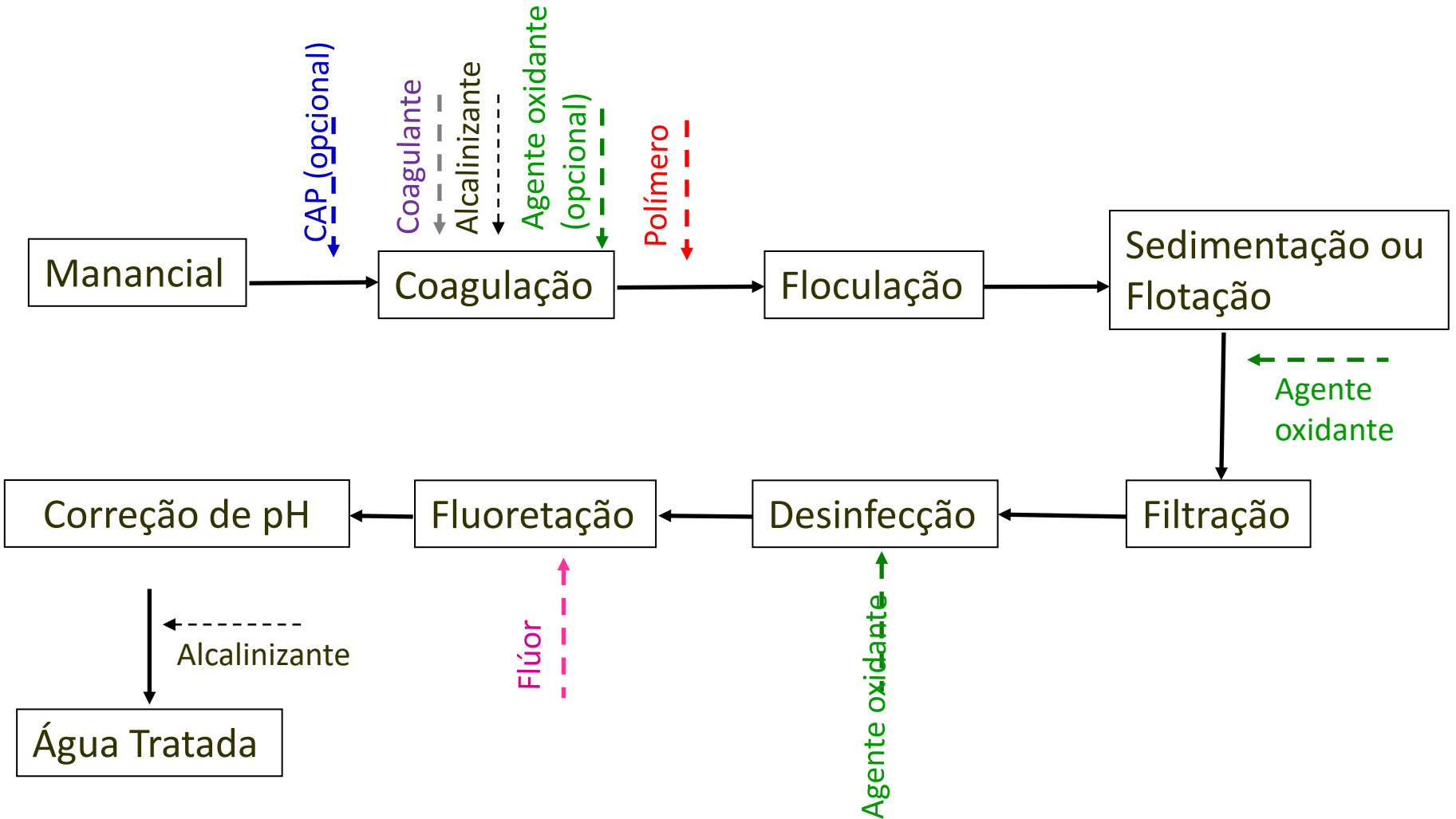
- Processos industriais?
- Irrigação de parques, praças e logradouros públicos e esportivos?
- Lavagem de veículos?
- Lavagem de pisos e ruas, incluindo o abatimento de poeiras em vias?
- Ornamentação, fontes, cachoeiras e espelhos d'água?
- Produção de concreto e lavagem de pisos para evitar a formação de poeira na construção civil?
- Prevenção contra incêndio, como água para hidrantes?
- Descarga de bacias sanitárias em banheiros residenciais, públicos, de estabelecimentos comerciais e industriais?
- Desobstrução de galerias de águas pluviais e rede coletora de esgoto?
- **Nenhumas das respostas acima.**

Para os usos que não requerem o padrão de potabilidade, fontes alternativas como a água de reúso precisam ser exploradas!

Pontos relevantes à atual concepção de ETAs

- A primeira concepção de sistema de tratamento de água concebida e posteriormente refinada foi a sedimentação e filtração em meio granular
- O principal objetivo a ser atendido era a produção de água para consumo humano com qualidade estética
- A desinfecção mediante o uso de cloro é uma prática recente (pouco mais de 100 anos)
- ETAs convencionais de ciclo completo são compostas por unidades de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção

Tratamento Convencional de Águas de Abastecimento



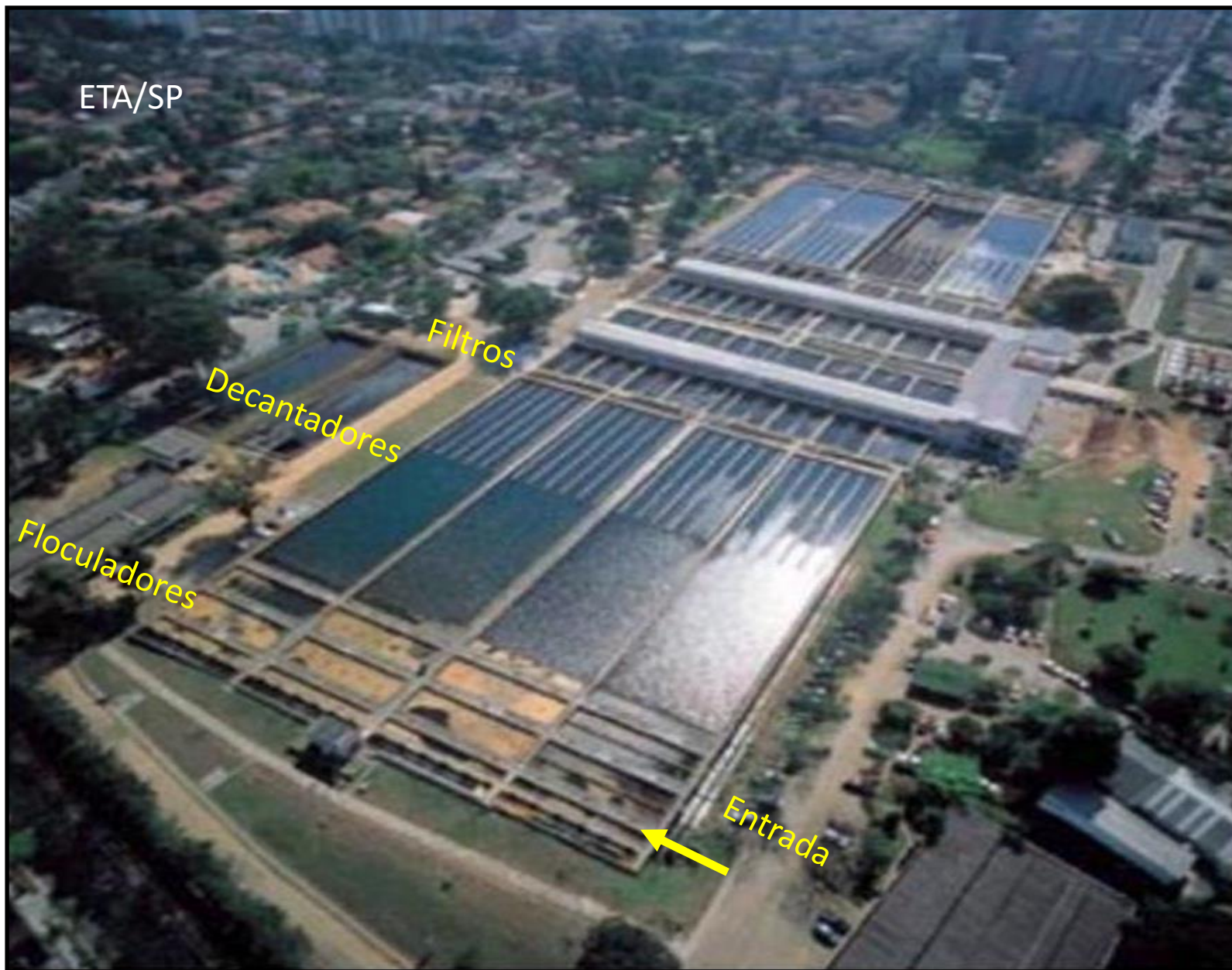
Coagulação e Floculação

Coagulação e floculação

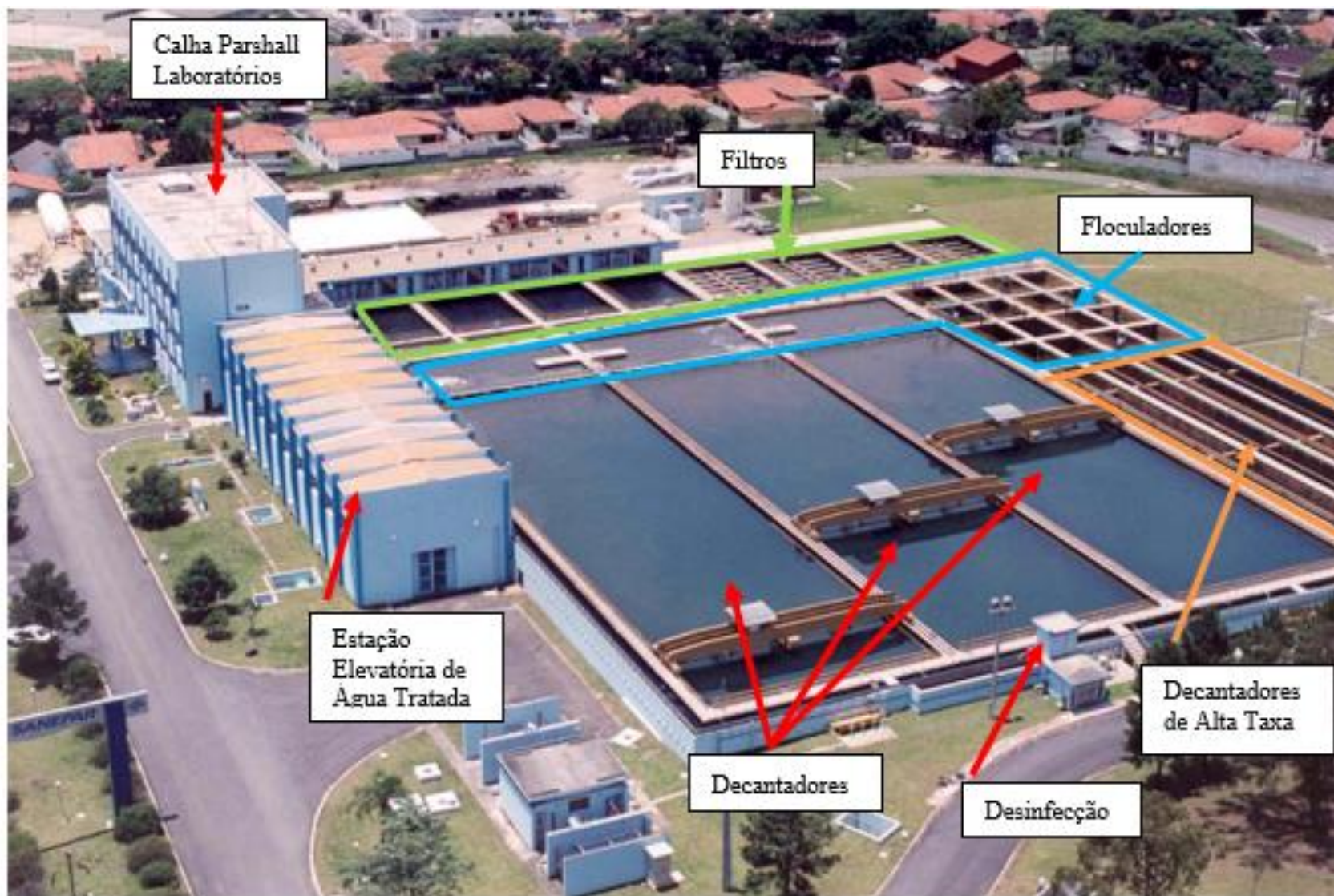
Finalidade:

- Transformar as impurezas (sólidos) que se encontram em suspensão fina (principalmente), em estado coloidal ou em solução (fração menor) em agregados maiores (flocos) para que possam ser removidas pelas operações de separação sólido-líquido (clarificação) como a sedimentação (ou flotação) e a filtração.

Tratamento Convencional de Águas de Abastecimento

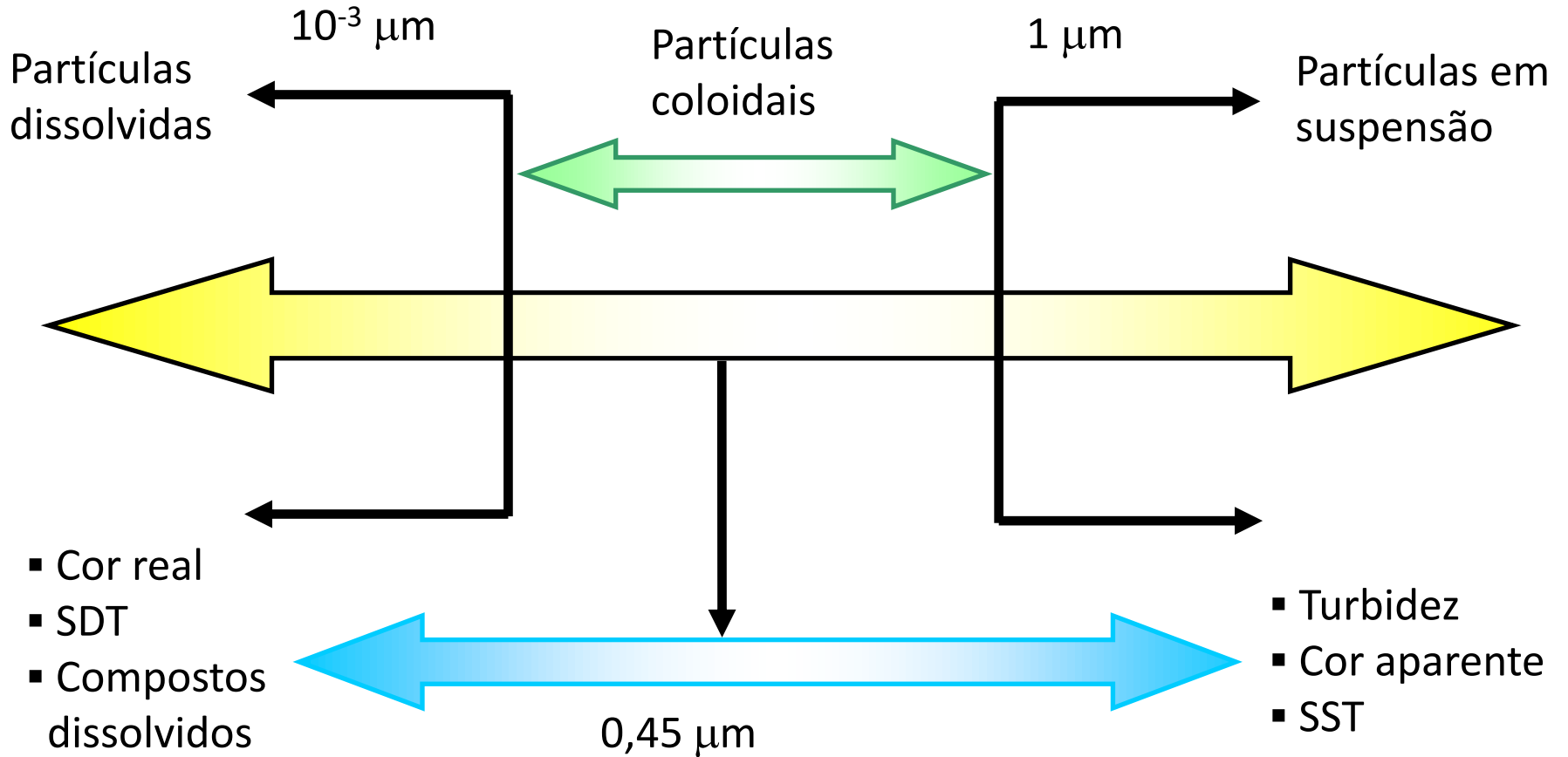


Tratamento Convencional de Águas de Abastecimento



ETA Iguaçu – Curitiba/PR

Distribuição das Partículas em Águas Naturais



Processos Membrana
Osmose Reversa
Nanofiltração

Tratamento convencional
Filtração em linha
Filtração direta
Filtração lenta

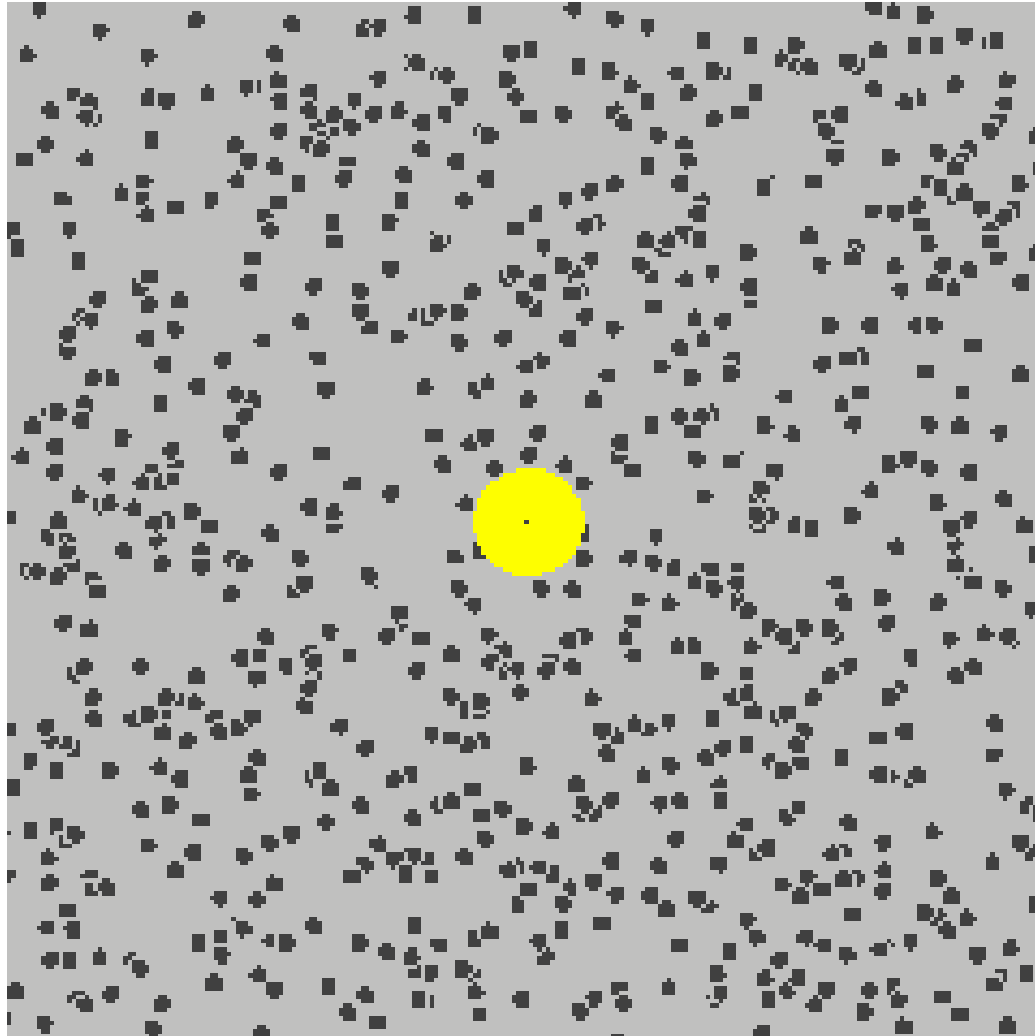
Tempo de Sedimentação x Tamanho das Partículas

Diâmetro Partículas (mm)	Tamanho das Partículas	Tempo Sedimentação (1 metro)
10	Cascalho	1 Segundo
1	Areia	10 Segundos
10^{-1}	Areia Fina	2 Minutos
10^{-2}	Argila	2 Horas
10^{-3}	Bactéria	8 Dias
10^{-4}	Colóide	2 Anos
10^{-5}	Colóide	20 Anos
10^{-6}	Colóide	200 Anos

Por que as partículas coloidais não se agregam naturalmente?

- Movimento Browniano
- Efeito Tyndall
- Comportamento Elétrico

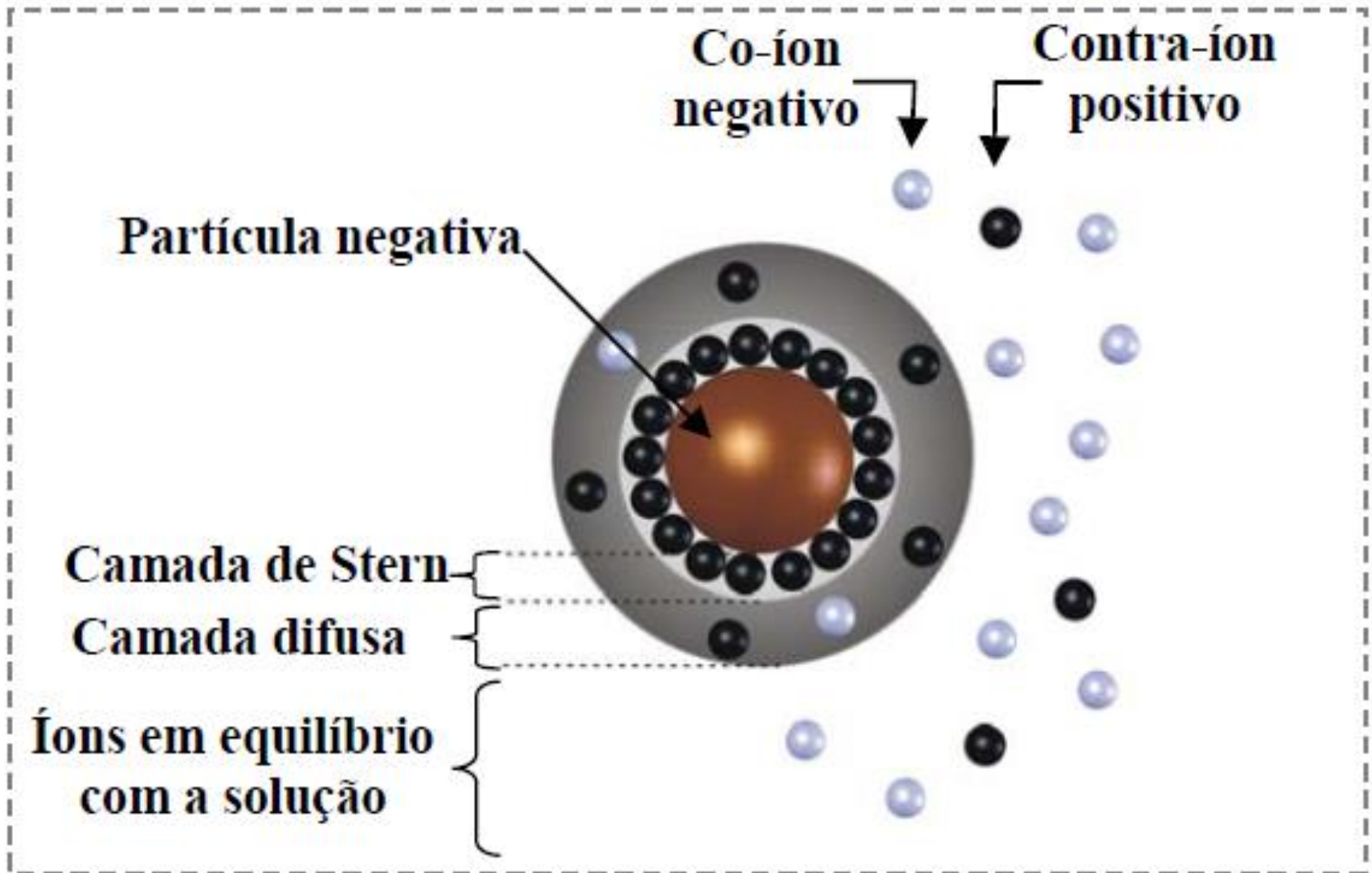
Movimento browniano



Efeito tyndall



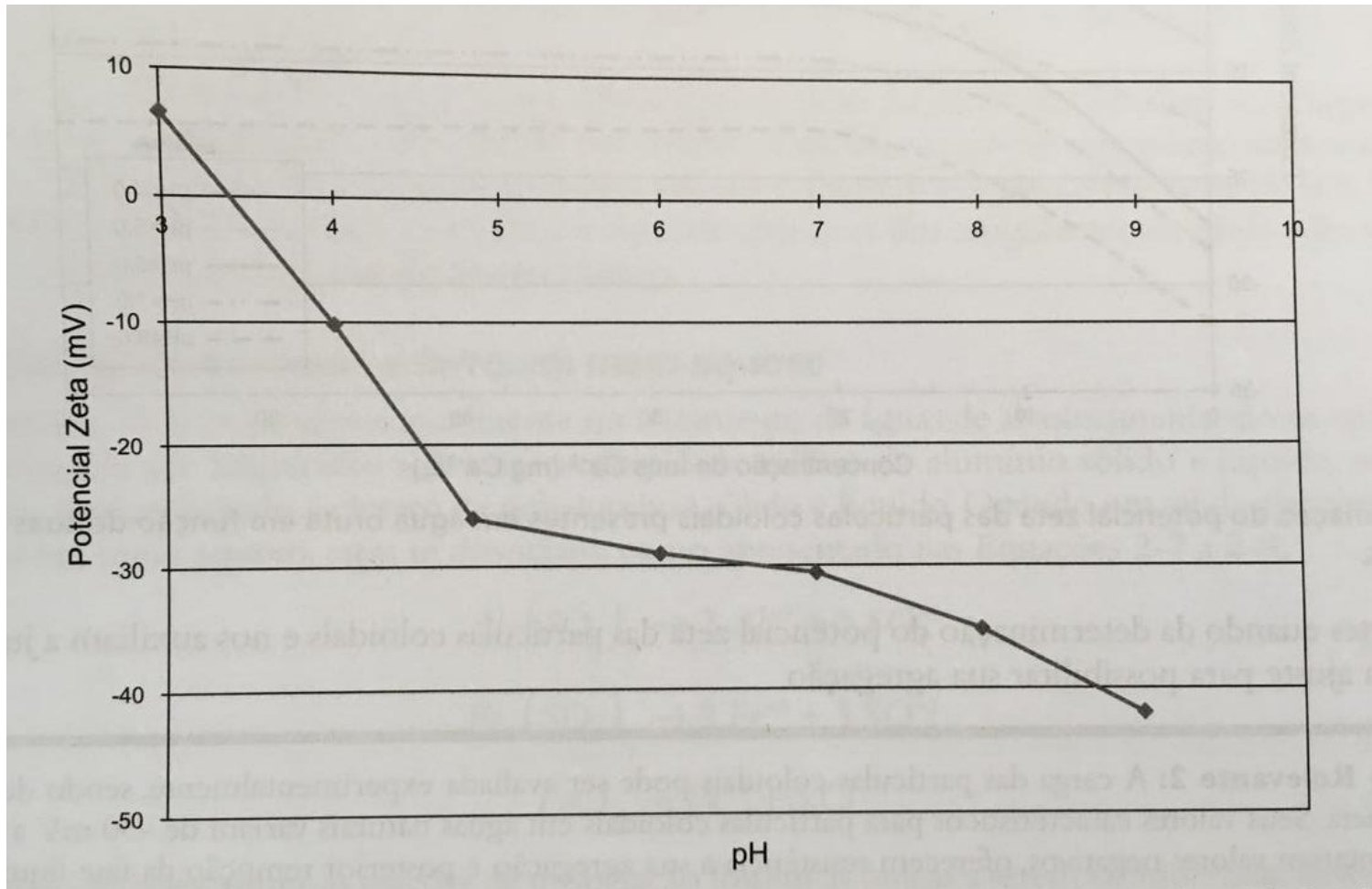
Comportamento elétrico: Dupla camada elétrica e potencial zeta das partículas



Potencial Zeta

- É a medida do potencial no plano de cisalhamento, localizado entre a partícula em movimento e o líquido circundante
- É realizado visando o conhecimento da densidade de carga superficial da partícula
- Quanto maior for a magnitude do potencial Zeta, maiores serão as forças de repulsão entre os colóides e mais estáveis serão as suspensões coloidais
- É um indicador útil dessa carga e pode ser usado para prever e controlar a estabilidade de suspensões ou emulsões coloidais
- A técnica mais utilizada para determinar o potencial zeta é pela medida da mobilidade eletroforética das partículas

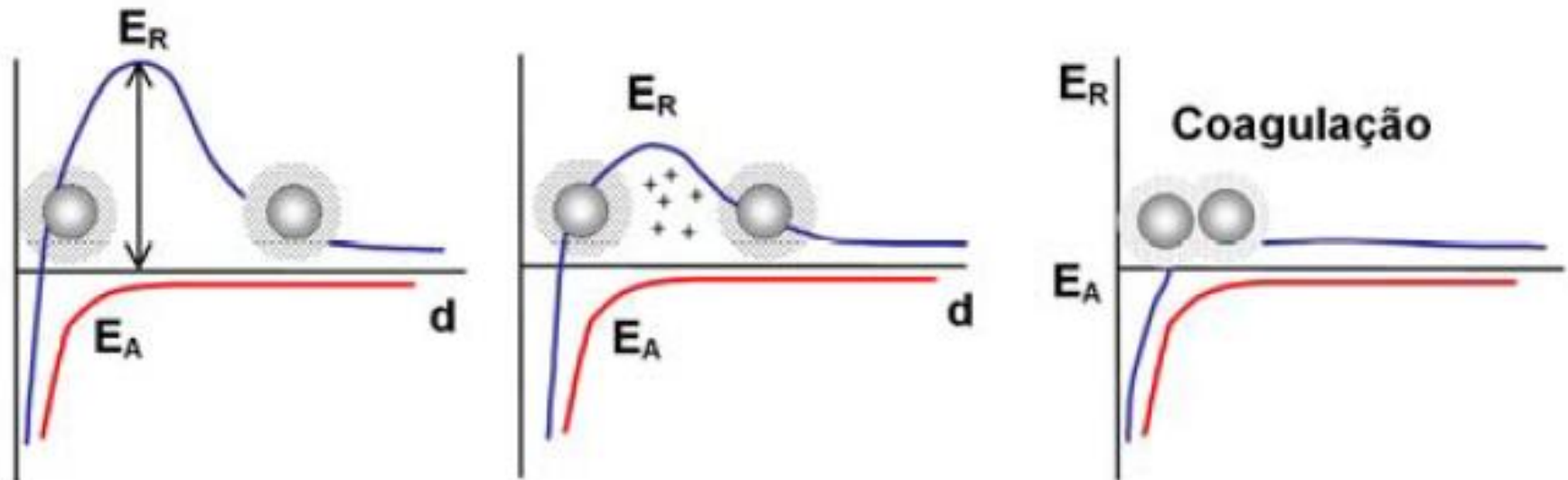
Variação do potencial zeta das partículas coloidais presentes em água bruta em função do pH da fase líquida



Fonte: Ferreira Filho (2017)

Processos de coagulação com sais hidrolisáveis

- Aumento da intensidade iônica - compressão da dupla camada
- Adição de sais inorgânicos para neutralizar o potencial, reduzir a energia de repulsão e permitir a atuação das forças de atração



Processos de coagulação com sais hidrolisáveis

Precipitados na forma de hidróxidos

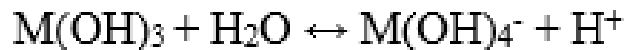
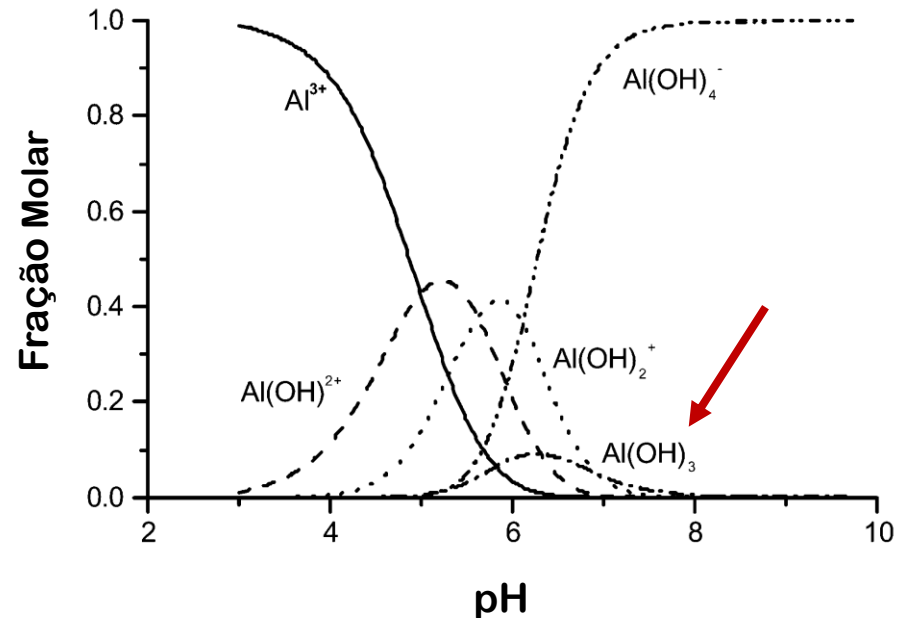


Diagrama de espécies do alumínio



Fonte: Duan e Gregory (2003)

Mecanismos de coagulação:

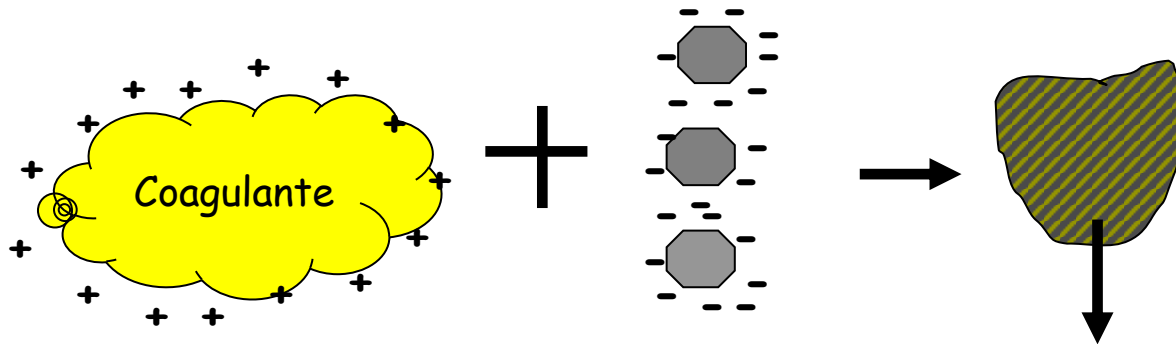
- Neutralização de cargas superficiais
- Efeito “varredura” (mecanismo mais atuante em ETAs)

Precipitação de hidróxido de ferro



Mecanismos de coagulação

- Neutralização e desestabilização das partículas suspensas, ou seja, remoção das forças que as mantêm separadas
- Varredura
- Partículas são agregadas em pequenas massas (agregados/coágulos), com densidade superior a da água



Coagulação utilizando sais de ferro ou alumínio

Coagulante	Função	Faixa de pH teórica/empírica
Sulfato de Alumínio $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$	Fácil transporte e manejo, custo baixo	5 a 8
Sulfato Ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Tratar águas com pH elevado	8,5 a 11
Sulfato Férrico $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Tratar águas cor ou ácidas	5 a 11
Cloreto Férrico $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Bons flocos, amplo intervalo pH	5 a 11
Cloreto de polialumínio $\text{Al}_n (\text{OH})_m \text{Cl}_{3(n-m)}$	Flocos compactos, amplo intervalo de pH	5 a 8

Coagulação

Concentração aplicada de coagulantes

- Sulfato de Alumínio (5 mg/L a 100 mg/L)
- Cloreto Férrico (5 mg/L a 70 mg/L)
- Sulfato Férrico (8 mg/L a 80 mg/L)
- Coagulantes Orgânicos Catiônicos (1 mg/L a 4 mg/L)

Auxiliares de Coagulação

Produtos adicionados para aumentar a performance dos coagulantes comuns

- Ajustadores de pH - alcalinizantes
- Polímeros

Coagulação

Características de um bom coagulante

- Produzir íons positivos que neutralizem as cargas elétricas dos colóides
- Produzir reações gerando hidróxidos
- Não causar problemas na saúde do consumidor
- Custo acessível e disponibilidade
- Compatível com pH da água

Aplicação dos Coagulantes

- Misturadores

Coagulação

Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos

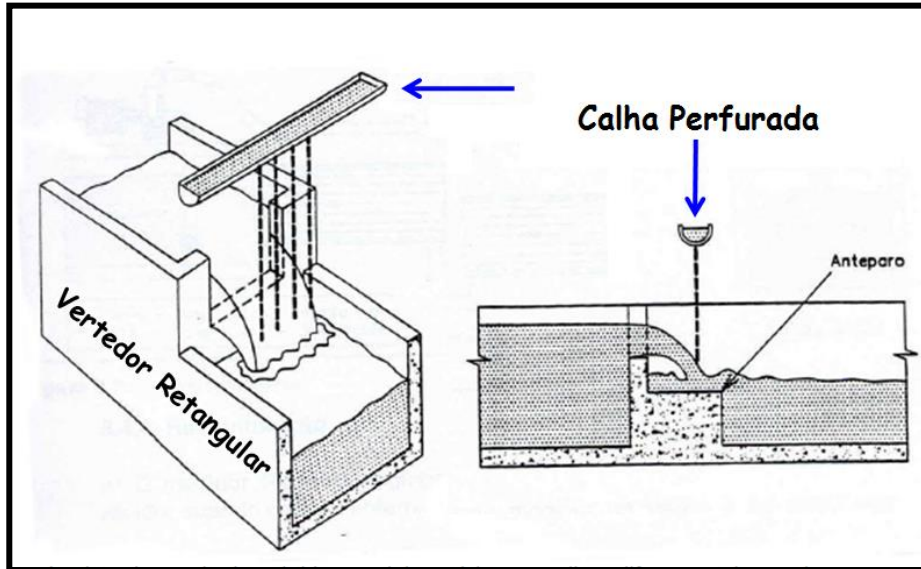
NBR 12.216/92: Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público

Sistemas Hidráulicos (Misturadores Hidráulicos)

- Canal ou canalização com intensa turbulência
- Ressalto hidráulico
- Medidor (calha, vertedor) Parshall
- Difusores

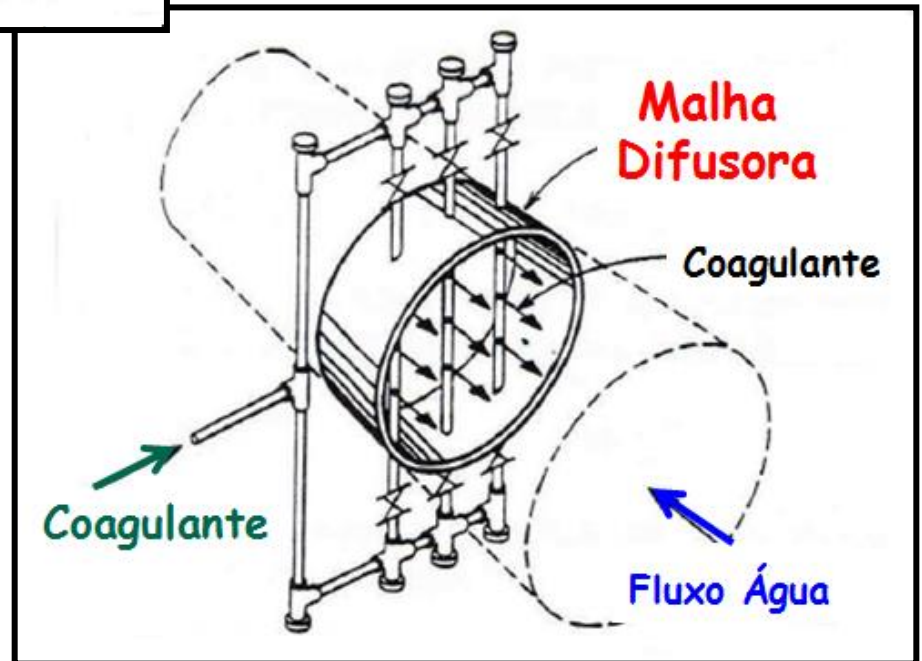
Sistemas Mecânicos (Misturadores Mecânicos)

- Agitadores mecanizados (turbinas, pás, hélices)
- Bombas centrífugas

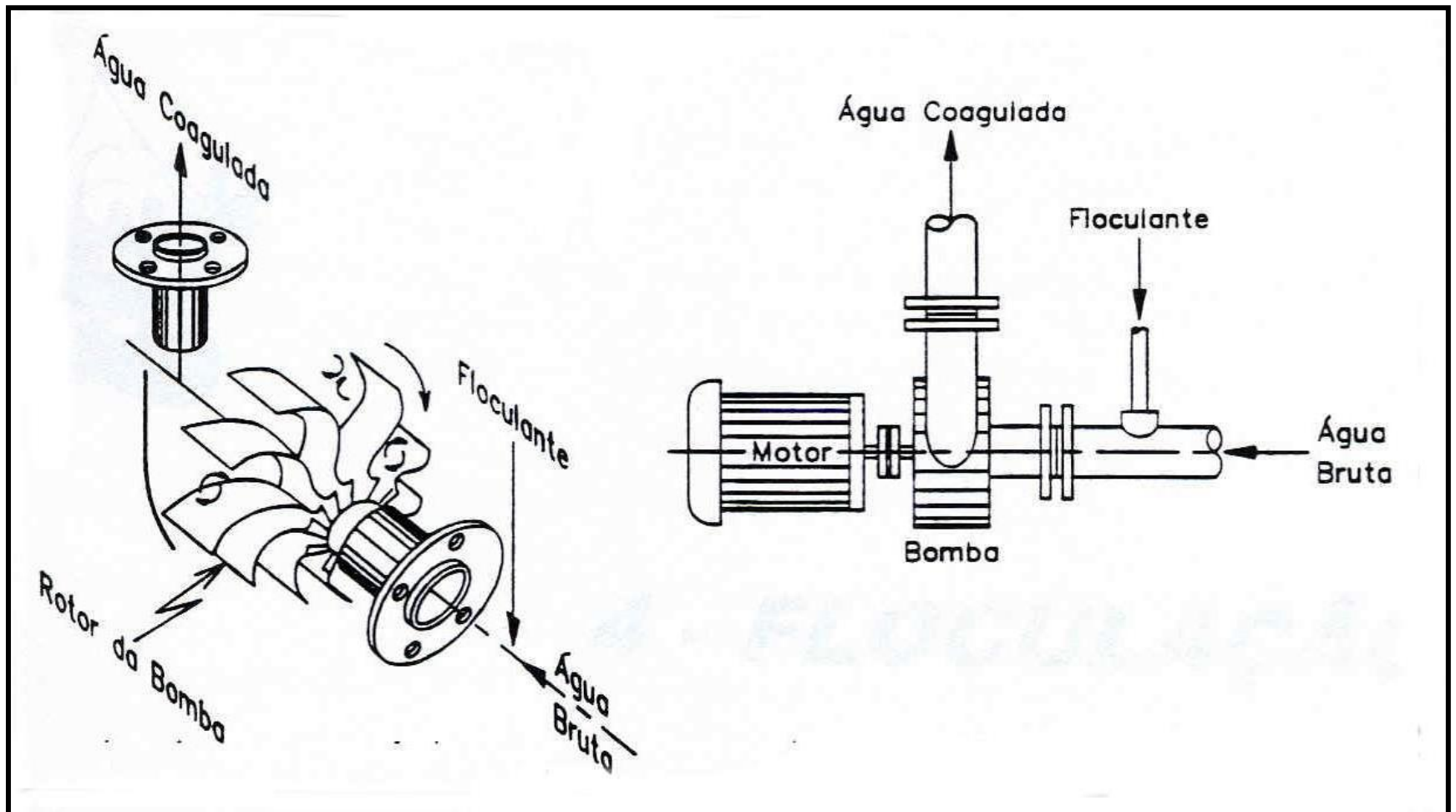


Vertedor Retangular

Malha Difusora



Rotores de Bomba



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos



ETA/SP



ETA /RS



ETA /SP



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos



ETA /SP



ETA /Curitiba

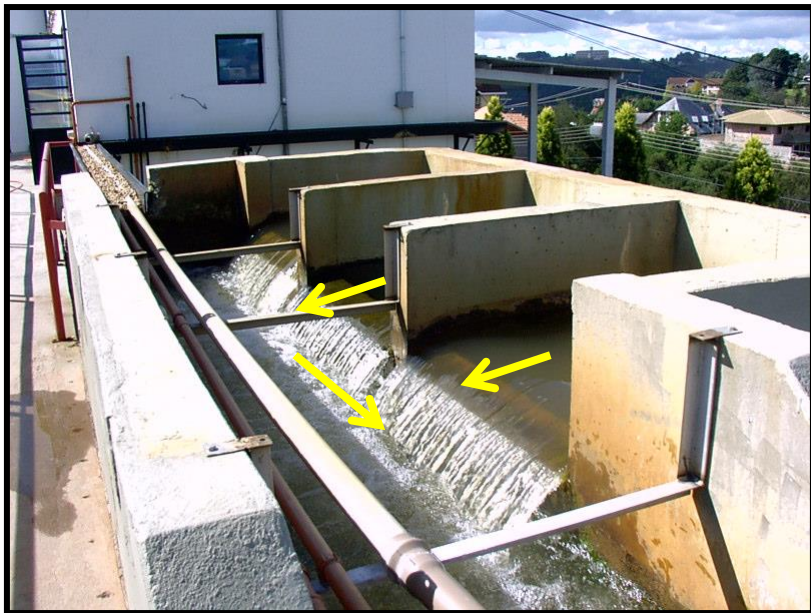


Sistema de Dosagem de coagulante

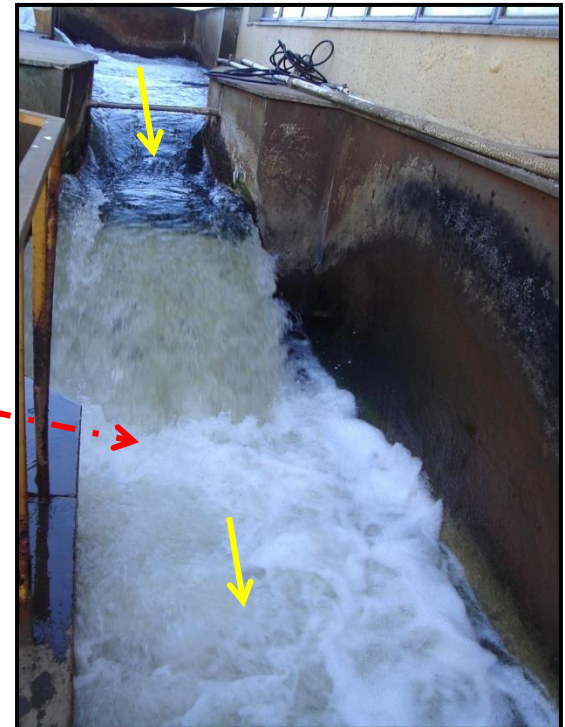
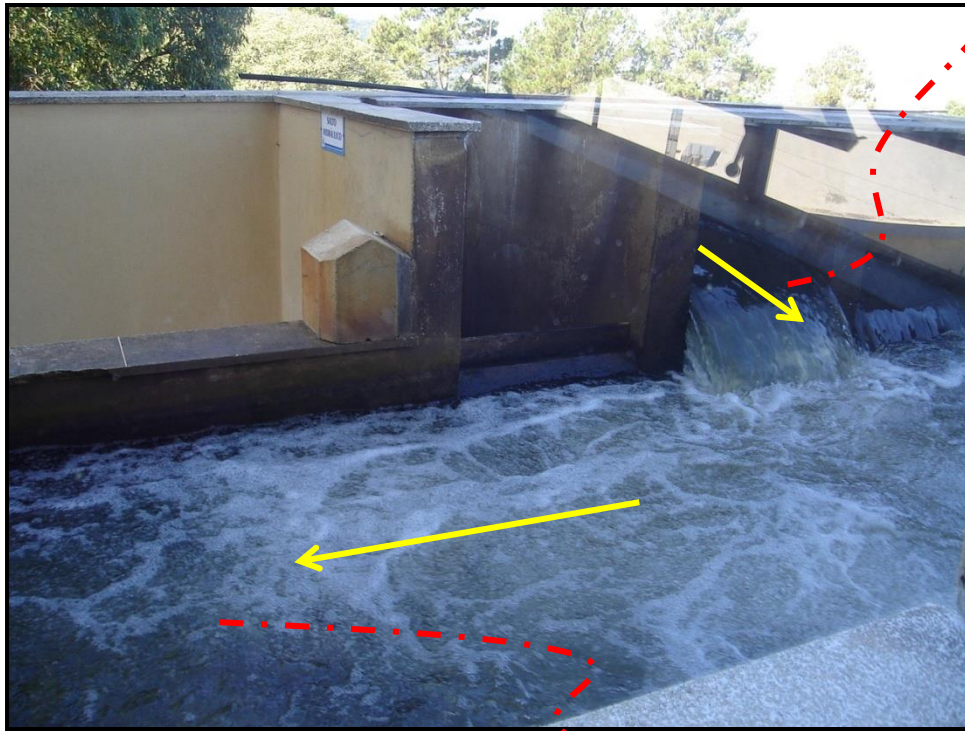
ETA /Curitiba



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos



ETA RS

Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos



ETA RS

Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos

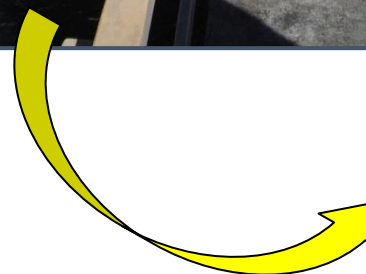
Calha Parshall



ETA/RS



Canal de Coagulação
Floculação



Floculadores



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos (tanque agitado)



Fonte: <http://www.tanquedeacoinox.com.br/tanque-de-aco-inox-com-agitador/>

Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos (tanque agitado)



Sistemas de Dispersão: Misturadores Rápidos (tanque agitado)



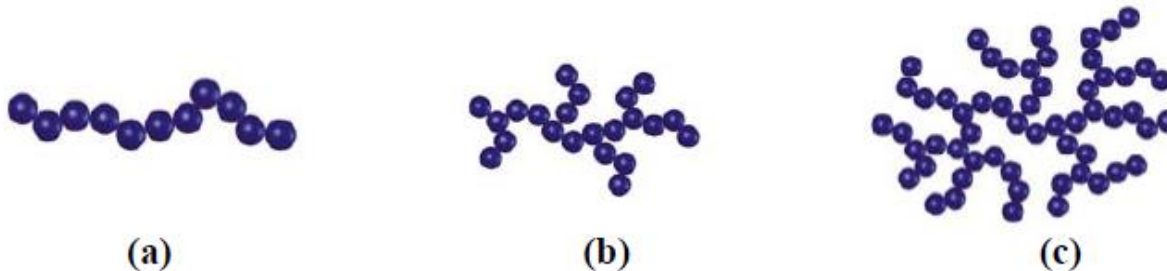
Fonte: <https://www.tratamentodeagua.com.br/wp-content/uploads/2016/02/Misturadores-Sigma.pdf>

Floculação

- Definição: É um processo físico no qual as partículas coloidais são colocadas em contato umas com as outras, de modo a permitir o aumento do seu tamanho físico, alterando, desta forma, a sua distribuição granulométrica
- Uso de polímeros hidrossolúveis (floculantes)
- Aumento da taxa de sedimentação
- Redução da dosagem de coagulante e do volume de lodo
- Limitações relativas a toxicidade (Padrão de acrilamida = 0,5 $\mu\text{g.L}^{-1}$)

Floculação

- Mecanismos:
- Adsorções das cadeias poliméricas que ocorrem quando afinidades, entre ambas (cadeias e partículas) são estabelecidas
- Esta afinidade não requer grandes níveis, porém, deve ser suficiente para que muitos pontos das cadeias poliméricas possam interagir com os sítios ativos da superfície da partícula e, assim, não permitir uma dessorção total do polímero

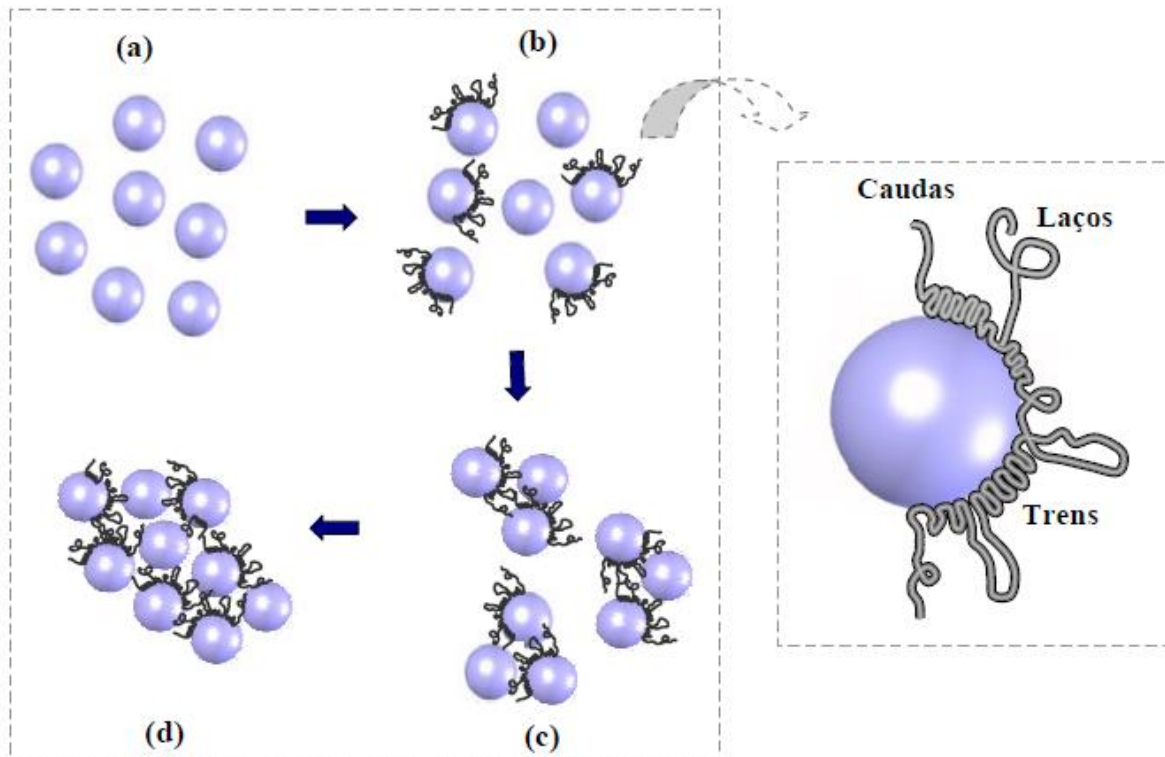


Tipos de estrutura das cadeias poliméricas dos floculantes: a) cadeia linear; b) cadeia com ramificações primárias; c) cadeia com ramificações primárias e secundárias

Floculação

- Mecanismos e interações entre polímeros e partículas
- Forças de interação eletrostáticas (polímeros com carga oposta à das partículas)
- Pontes de hidrogênio (óxidos)
- Ligações iônicas (Ex.: Ca^{+2})
- Pontes poliméricas
- Patch flocculation

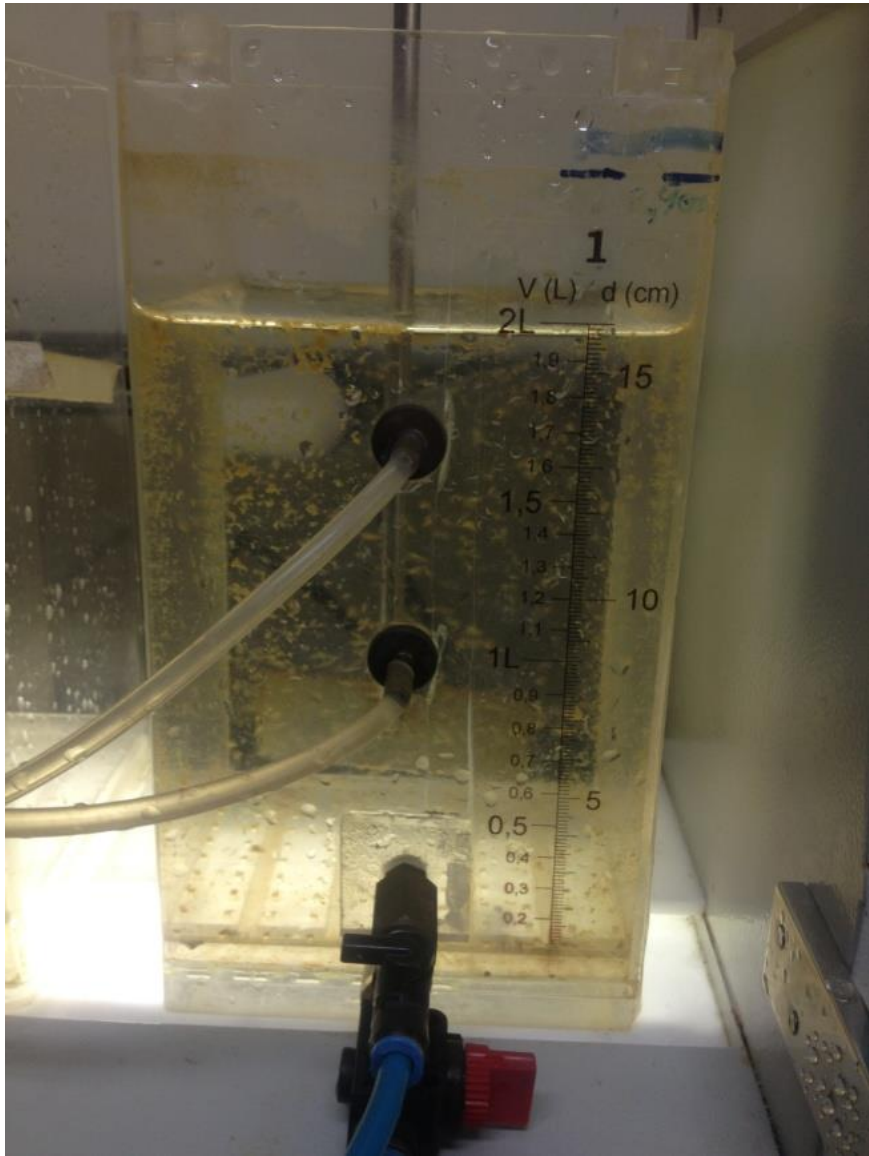
Mecanismo de pontes poliméricas



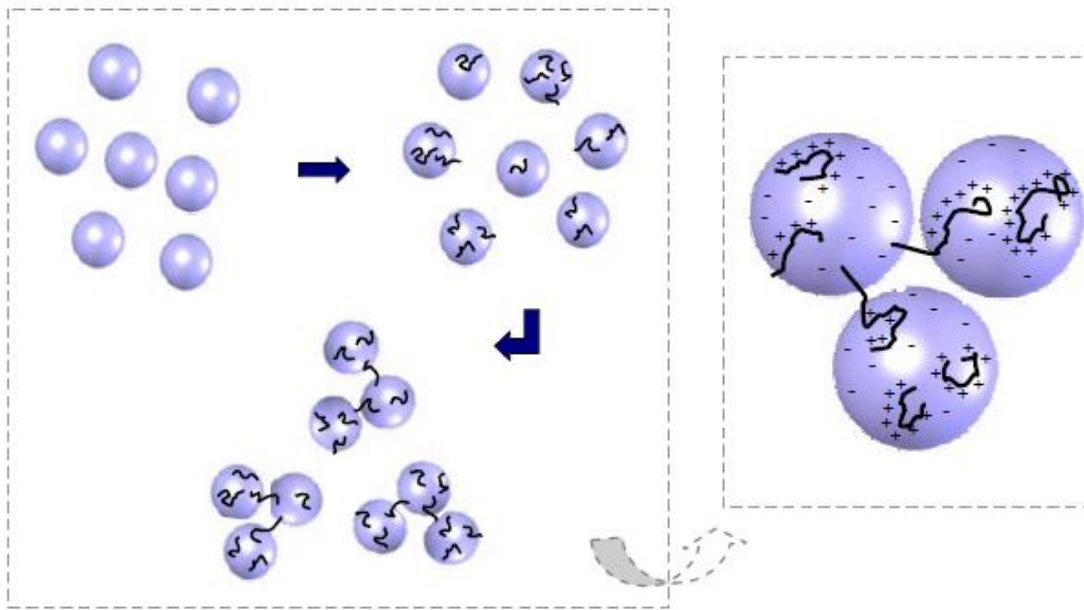
- Difusão das macromoléculas
- Adsorção das macromoléculas
- Conformação das cadeias poliméricas
- Crescimento de flocos

Floculação por pontes poliméricas

- Concentração ótima depende da área superficial e concentração de partículas (sólidos) em suspensão!
- Parâmetro referencial: ≤ 1 mg de polímero por g de sólidos suspensos



Mecanismo de neutralização ou adsorção *patch*



Observado em sistemas constituídos de polímeros de elevada carga catiônica e partículas aniônicas em suspensão

Floculação

Polieletrólitos ou Polímeros

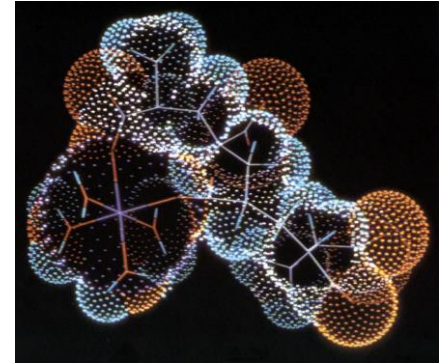
- Materiais sintéticos
- Polímeros de longa cadeia molecular
- Polímeros catiônicos ou aniônicos

Quando usar?

- Estações acima da capacidade nominal
- Melhora na qualidade água
- Reduzir o consumo de coagulantes
- Processos de sedimentação, flotação e filtração
- Reduz volume de lodo nos sedimentadores

Vantagem do seu uso?

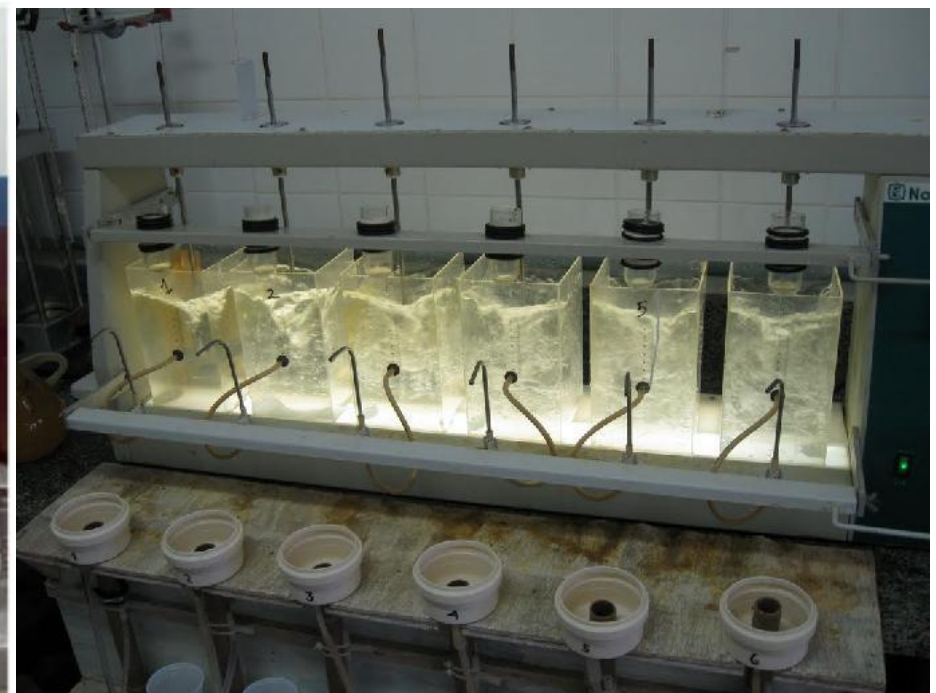
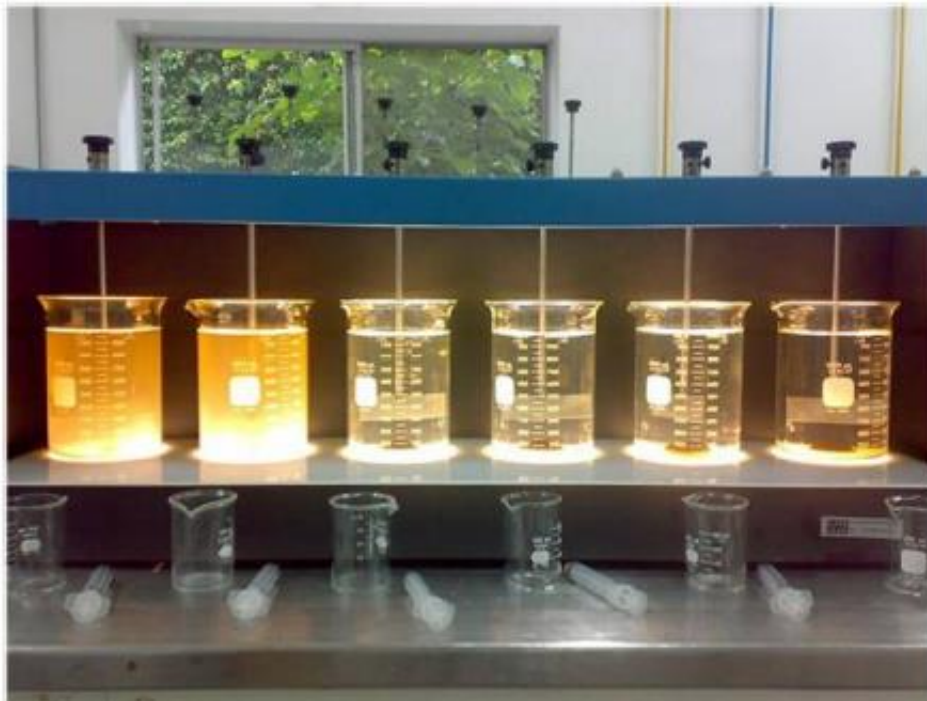
- Tamanho dos flocos x velocidade de sedimentação



Testes de Jarros (escala de laboratório)

Otimização das etapas de coagulação e floculação:

- Concentração de reagentes
- pH de processo
- Gradientes de velocidade
- Tempos de residência



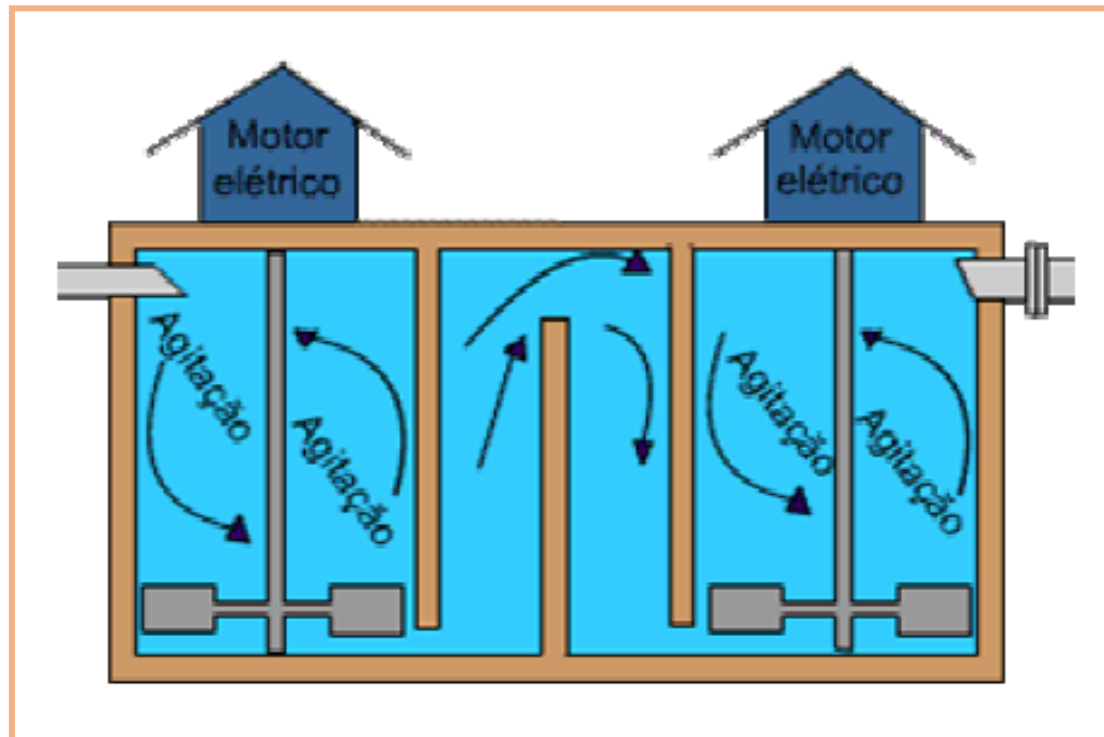
Floculadores Mecânicos

- Floculador de Paletas de Eixo Vertical
- Floculador de Paletas de Eixo Horizontal
- Floculador de Paleta Única de Eixo Vertical
- Floculador Mecânico de Eixo Vertical Tipo Fluxo Axial

Floculadores Mecânicos

Tipos de agitadores

1 - Floculadores de Paleta

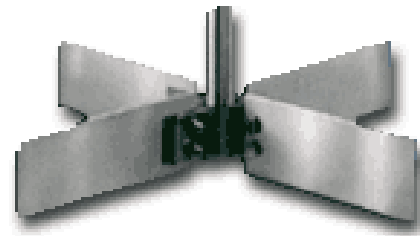
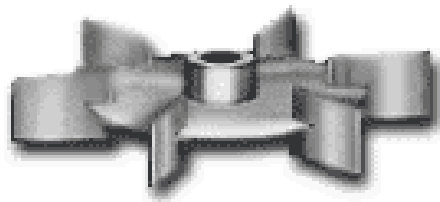


Floculadores Mecânicos

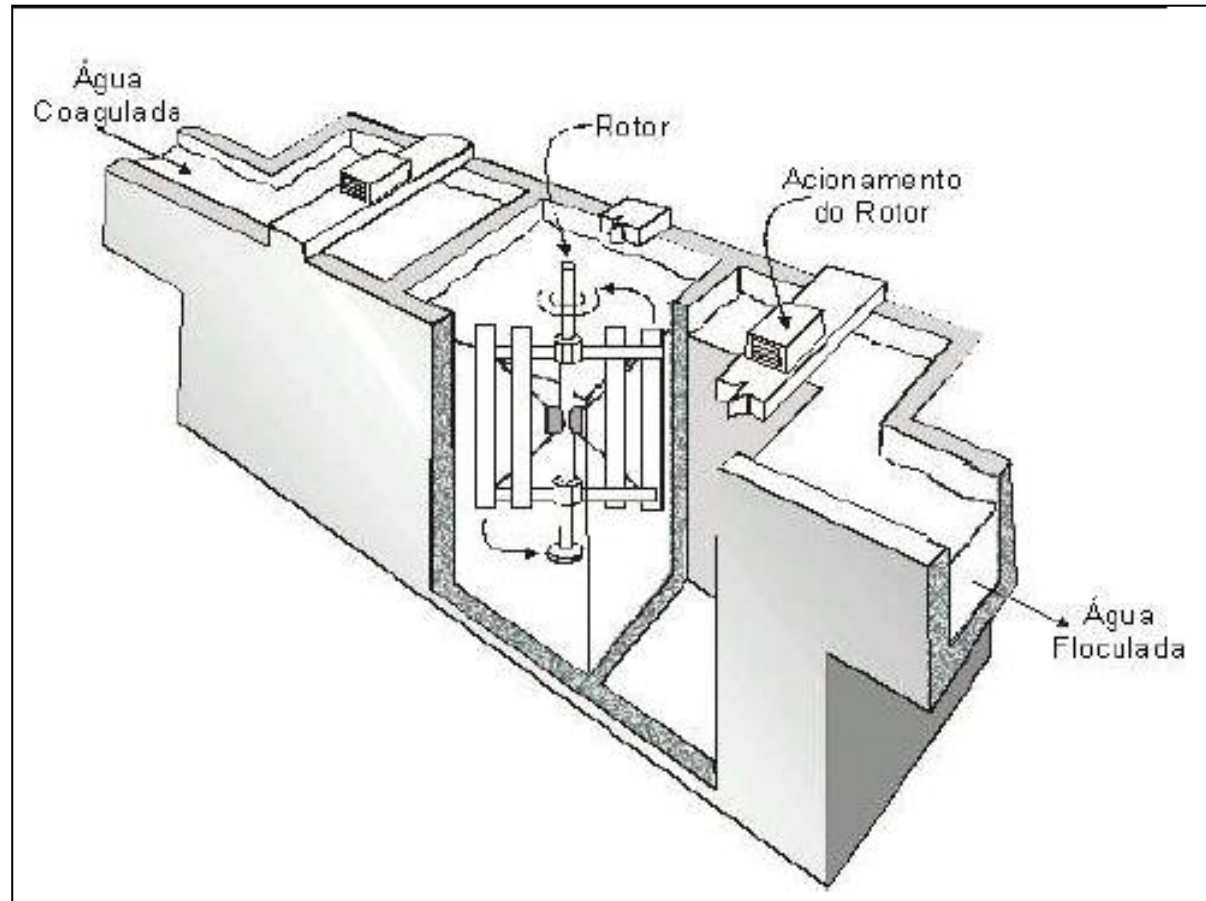
Tipos de agitadores

2 - Fluxo axial

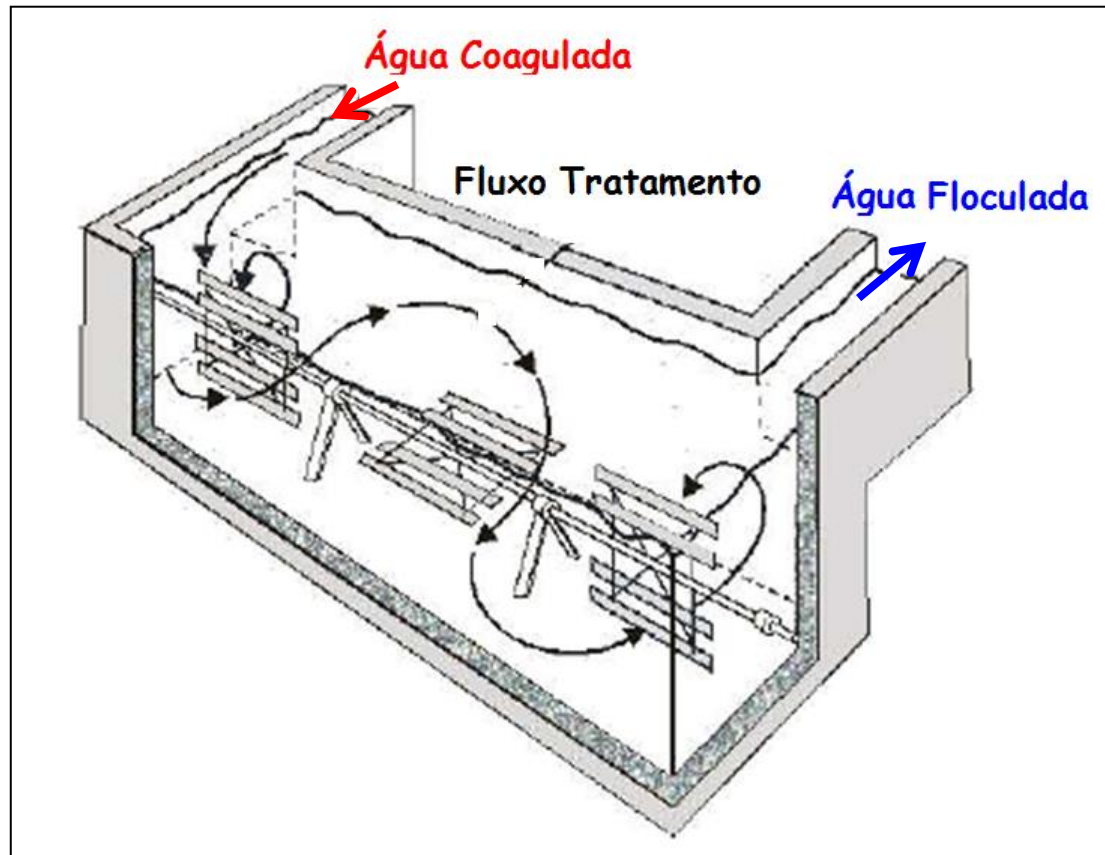
Hélice e turbina



Floculador Mecânico de Paletas de Eixo Vertical



Floculador Mecânico de Paletas de Eixo Horizontal



Floculador Mecânico de Eixo Vertical Tipo Fluxo Axial



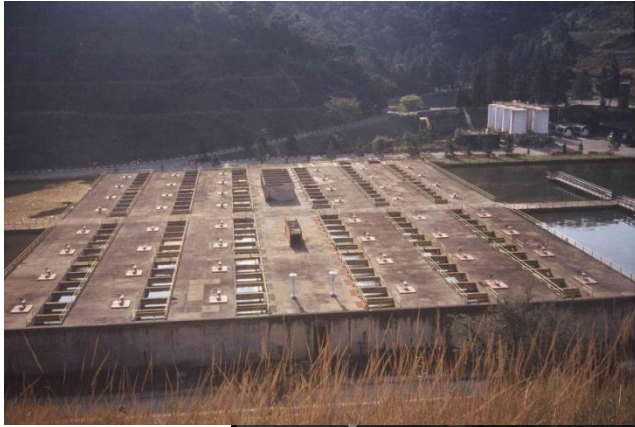
Floculador Mecânico de Eixo Vertical Tipo Fluxo Axial

ETA Alto Tiete/SABESP



Floculador Mecânico de Eixo Vertical Tipo Fluxo Axial

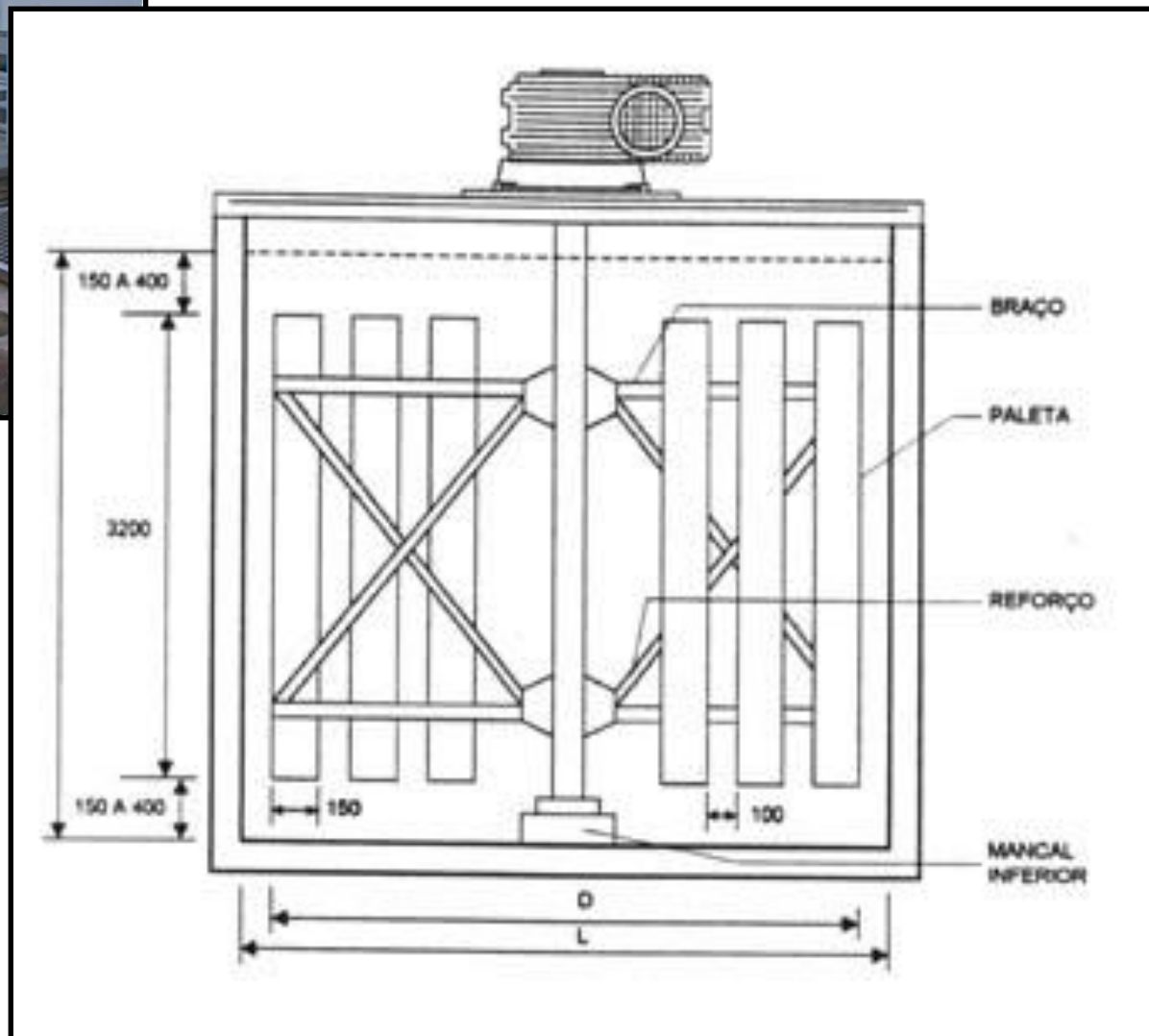
ETA Guaraú/SABESP



Floculador Mecânico de Paletas de Eixo Vertical



ETA RS



Floculador Mecânico de Paletas de Eixo Vertical



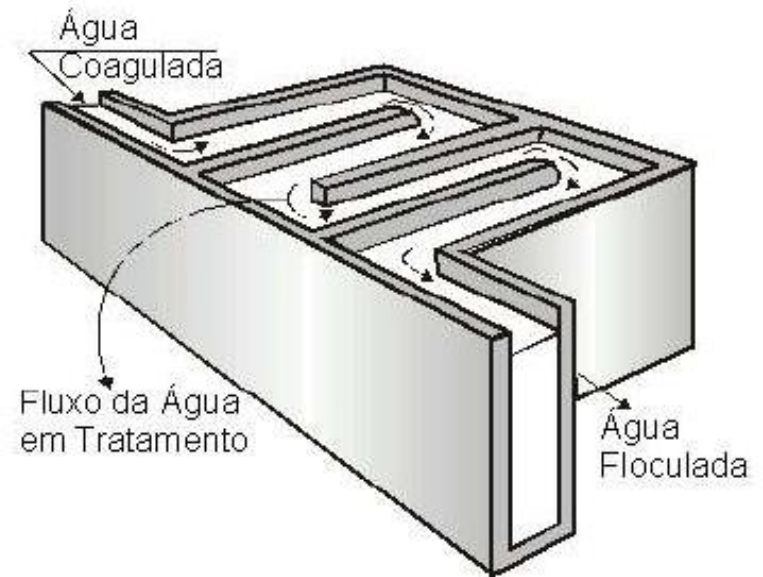
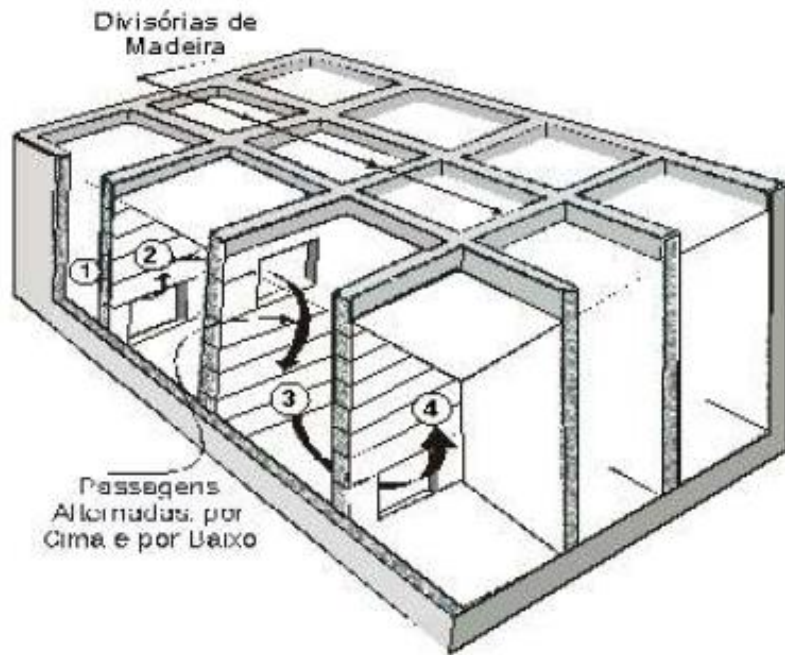
ETA Novo Hamburgo/COMUSA

Floculador Mecânico de Paletas de Eixo Vertical



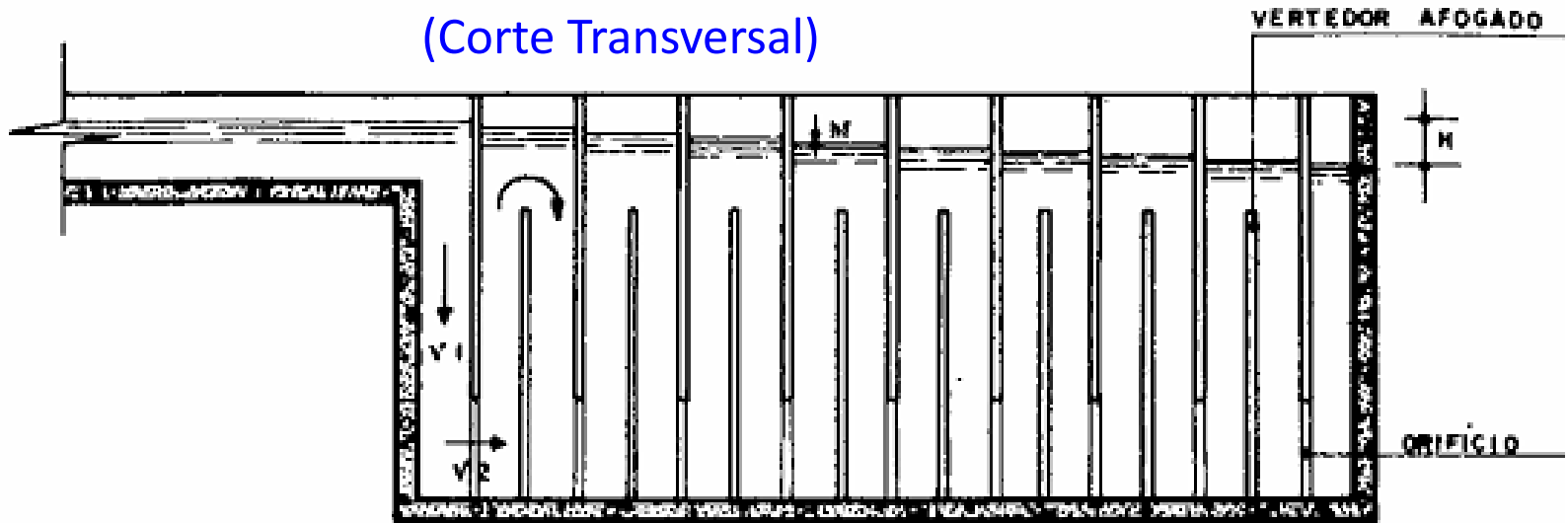
Floculadores Hidráulicos

- Floculador de Chicanas (Horizontais ou Verticais)
- Floculador Tipo Cox
- Floculador Tipo Alabama

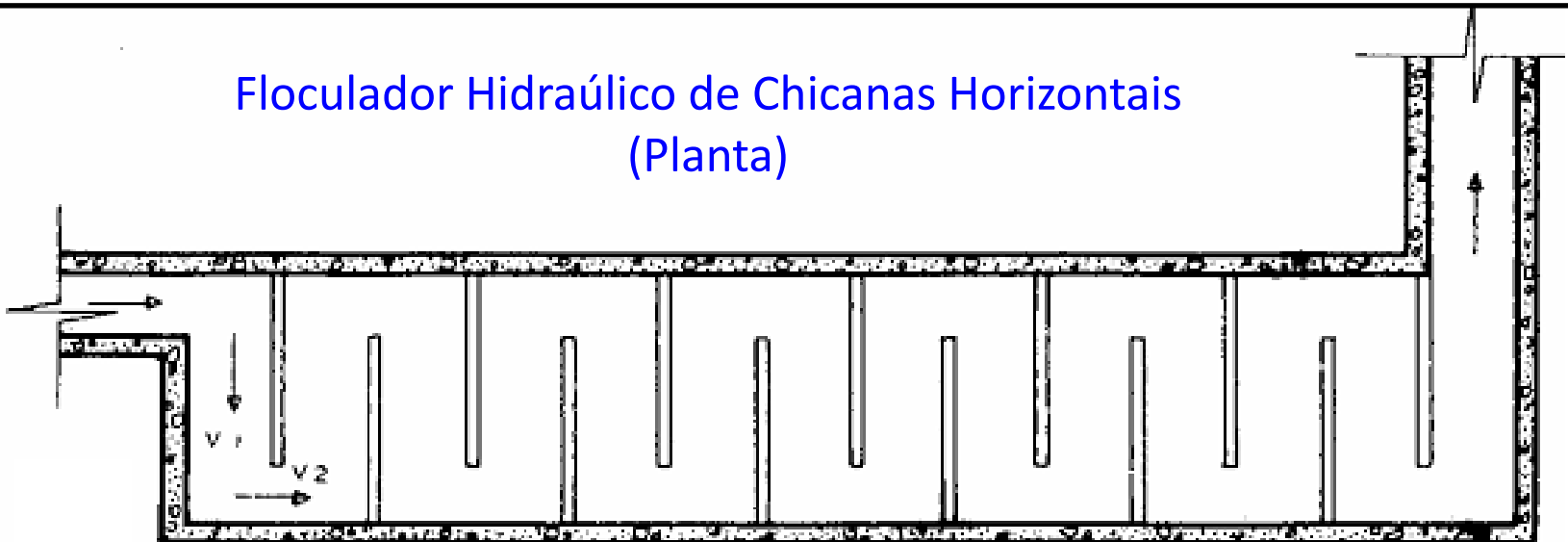


Floculadores Hidráulicos

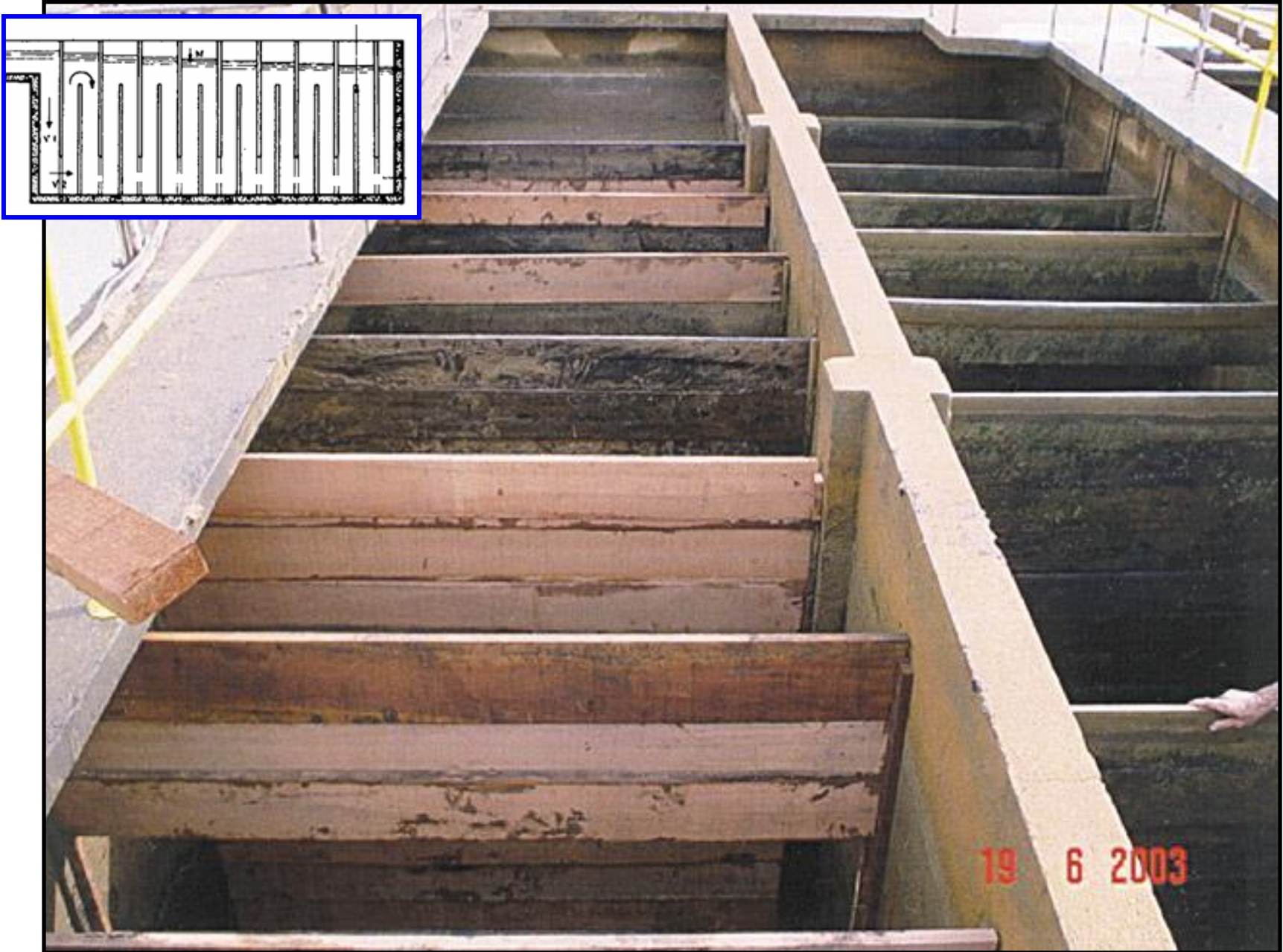
Floculador Hidráulicos de Chicanas Verticais
(Corte Transversal)



Floculador Hidráulico de Chicanas Horizontais
(Planta)

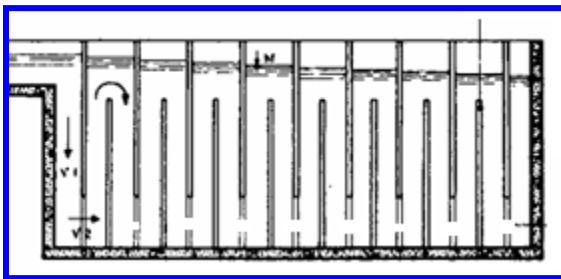


Floculador Hidráulico de Chicanas Verticais



Floculador Hidráulico de Chicanas Verticais

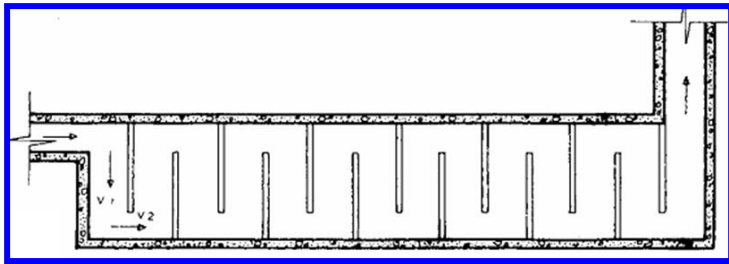
ETA SP



Floculador Hidráulico de Chicanas Horizontais



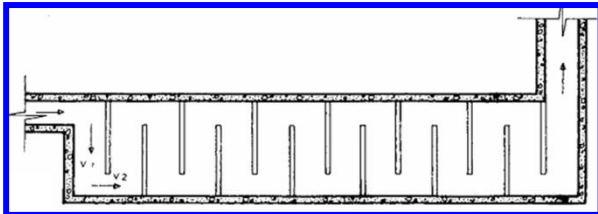
ETA SP



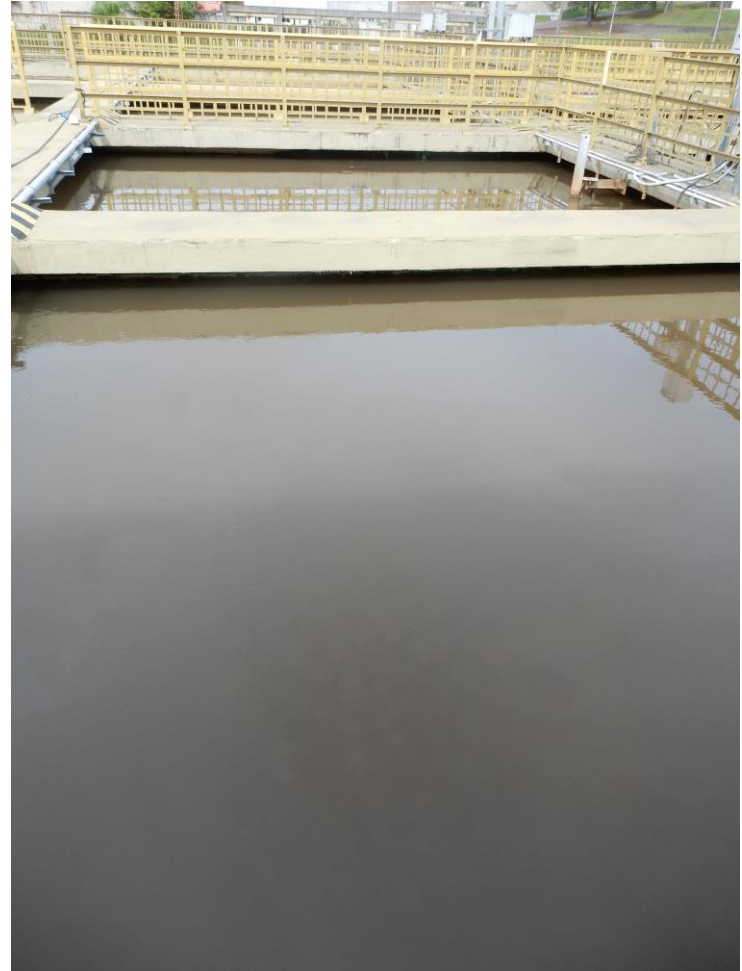
Floculador Hidráulico de Chicanas Horizontais



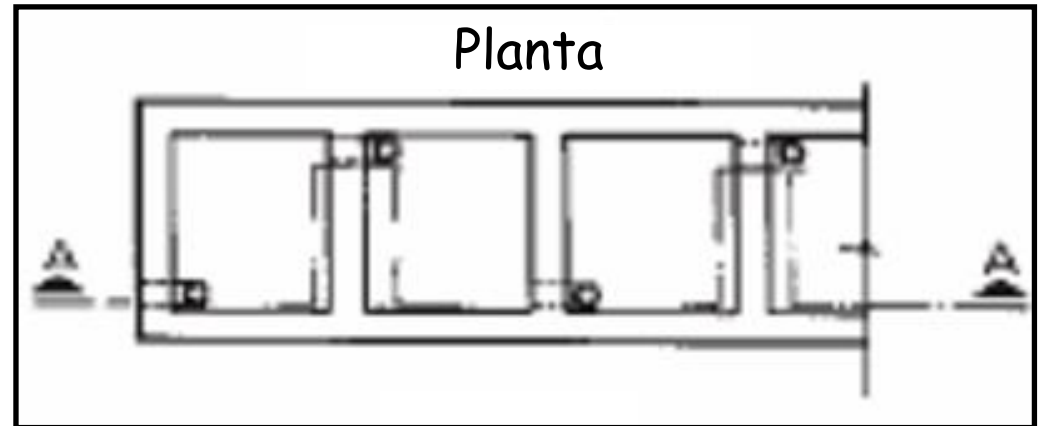
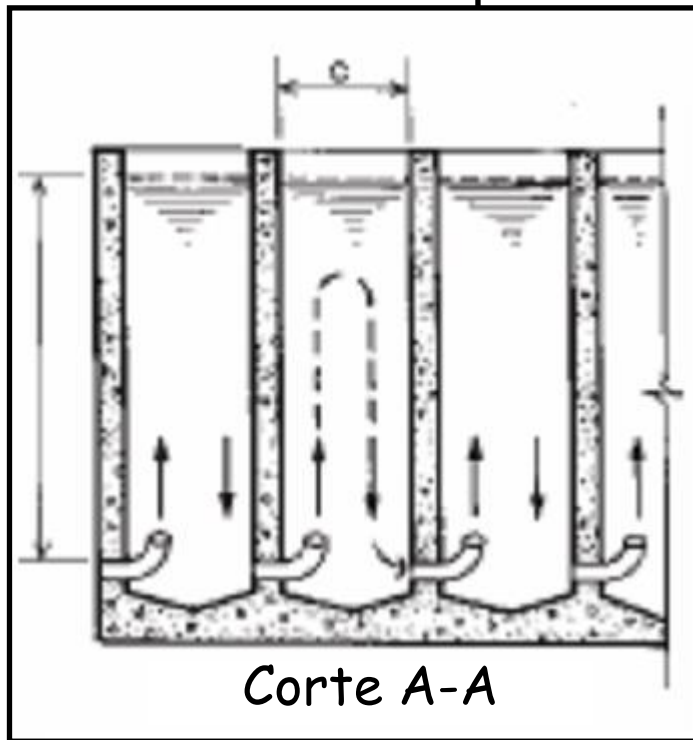
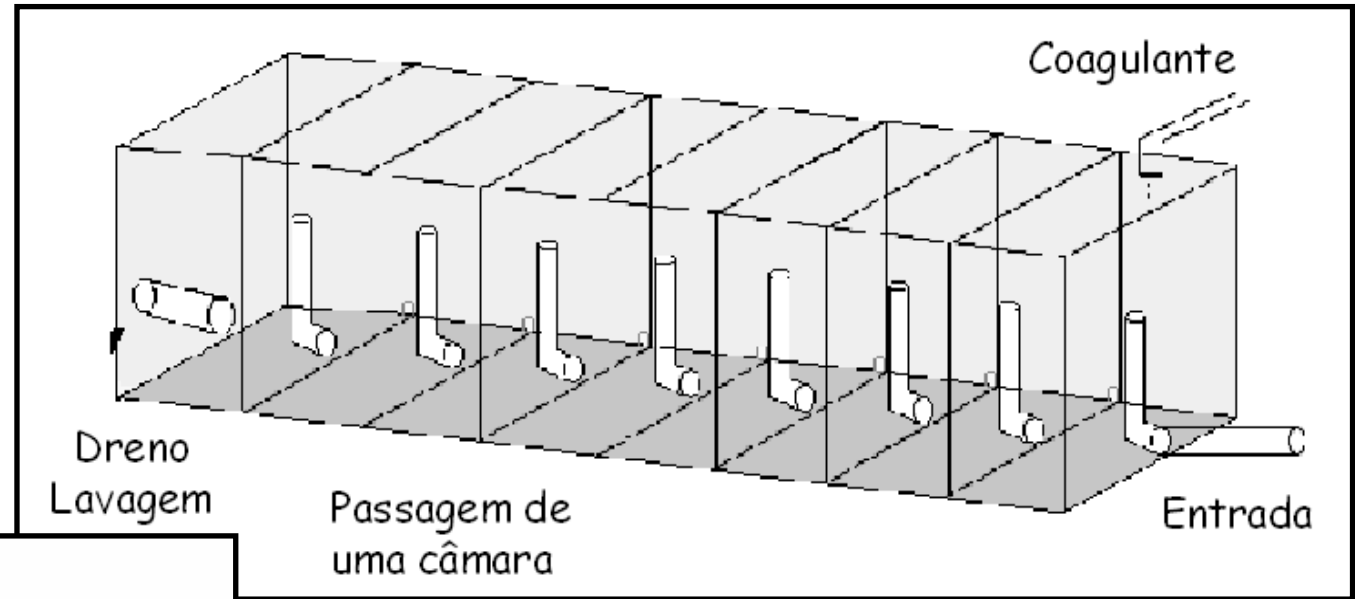
ETA Moinhos de Vento



Floculador Hidráulico de Chicanas Verticais

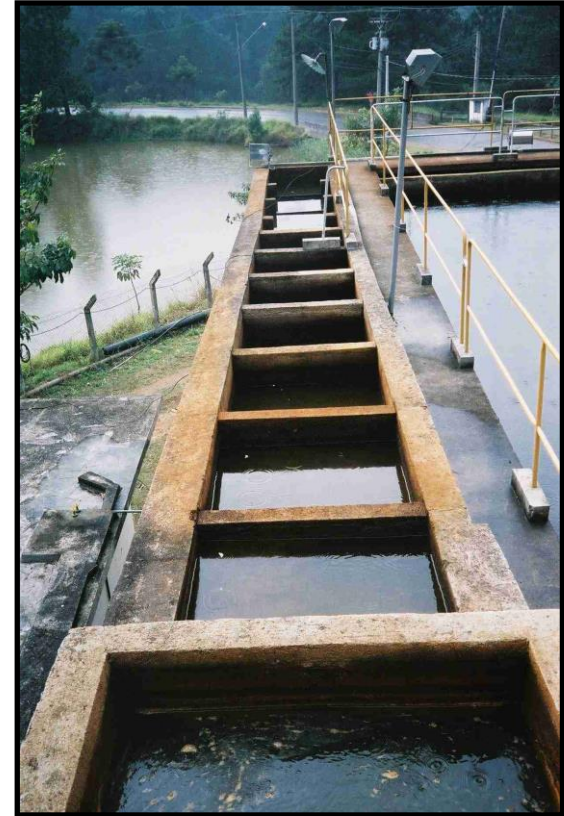
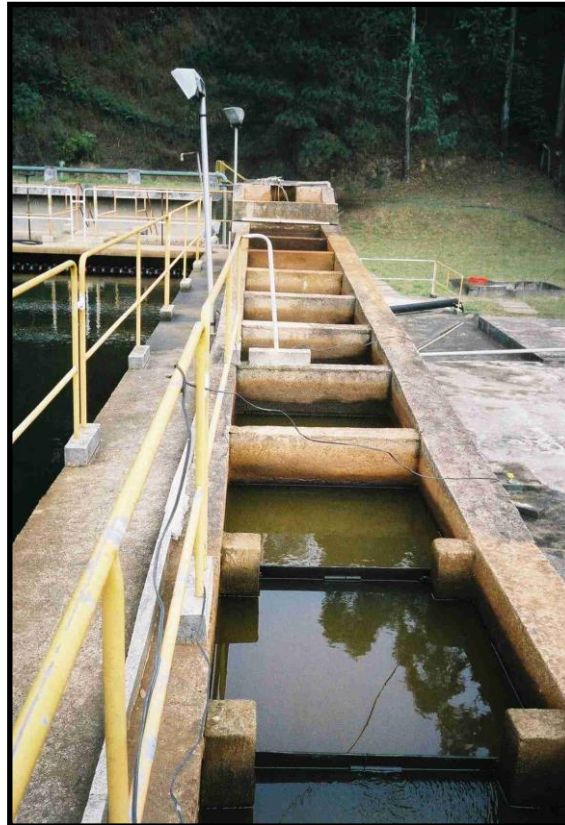


Floculador Hidráulico Tipo Alabama



Floculador Hidráulico Tipo Alabama

ETA Aldeia da Serra



Floculadores Mecanizados

Vantagens

- Mudança da velocidade de agitação
- Instalação em ETAs existentes

Desvantagens

- Equipamentos
- Energia elétrica
- Manutenção
- Curto-circuitos

Floculadores Hidráulicos

Vantagens

- Fluxo do sistema tipo pistão
- Tempo real de permanência igual ao teórico
- Operação
- Equipamentos
- Custo
- Instalações de médio porte
- Energia elétrica

Desvantagens

- Não é possível alterar a velocidade de agitação

Referencias online

- Ministério da Saúde - MS (2017). Portaria de Consolidação nº5/2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. **Anexo XX: Do controle e da vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**
- Azevedo, C.A. (2013) Estudos de flotação por ar dissolvido por bomba multifásica (FAD-B) e sedimentação lamelar (SL) no tratamento de água para abastecimento público (Canoas-RS). **Páginas: 37-44 (“Princípios físico-químicos no tratamento de água”)**. Dissertação de mestrado. UFRGS.

BIBLIOGRAFIA

- Richter, Carlos A. Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento. São Paulo, Ed. Blucher 2009.
- Libânio, Marcelo. Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água. Campinas, Editora Átomo. 2005.
- Di Bernardo, Luiz; Dantas, Angela Di Bernardo. Métodos e técnicas de tratamento de água. São Carlos: USP, 2005.
- Ferreira Filho, Sidney Seckler. Tratamento de água –concepção, projeto e operação de estações de tratamento. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017
- Vianna, Marcos Rocha. Hidráulica aplicada às estações de tratamento de água. 5 ed. Belo Horizonte: 1997.
- Tchobanoglous, George. Howe, Kerry; Crittenden , John C.; Hand David; Water Treatment: Principles and Design.–3th edition John Wiley & Sons: 2012
- Benjamin, Mark; Lawler, Desdond. Water quality Engineering: Physical Chemical Treatment Processes. John Wiley & Sons: 2013
- Davis, Mackenzie. Tratamento de Águas para Abastecimento e Residuárias: princípios e práticas. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.
- **ARTIGOS, DISSERTAÇÕES E TESES**