

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

Operação de separação de partículas sólidas suspensas com densidade superior à do líquido circundante.

>Aplicação

- ✓ Tratamento preliminar : remoção da areia
- ✓ Tratamento primário: decantação primária
- ✓ Tratamento secundário: decantação secundária
- ✓ Tratamento terciário: sedimentação após precipitação química
- ✓ Tratamento do lodo: adensamento

>Objetivos

- ✓ Produzir um efluente clarificado
- ✓ Adensamento do lodo

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

>Formas de sedimentação

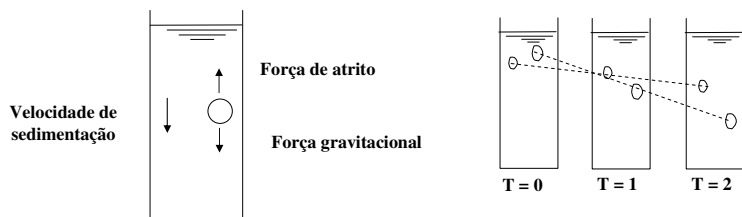
Tipo de sedimentação	Descrição	Aplicação/Ocorrência
Discreta	Partículas sedimentam-se como entidades individuais e não ocorre interação significativa com partículas vizinhas (baixa conc. Sólidos)	Remoção de areia
Floculenta	Partículas aglomeram-se durante a sedimentação, aumentando o tamanho e sedimentam-se com velocidades superiores. (suspensões diluídas)	- Dec. primários - Dec. secundários (superior) - Tanques sedimentação (precipitação)
Zonal	Partículas tendem a permanecer em uma posição fixas com relação as partículas vizinhas e sedimentam-se com uma massa única de partículas (suspensões concentradas)	- Dec. Secundários
Compressão	A concentração de partículas é tão elevada que ocorre a formação de uma estrutura e sedimentação ocorre apenas pela compressão desta estrutura, devido ao peso das partículas	- Dec. Secundários (fundo) - Adensadores por gravidade

✓Ocorrência simultânea dos vários tipos de sedimentação

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA



- ✓ Sem aglomeração das partículas
- ✓ Manutenção das propriedades físicas (forma, tamanho, densidade)
- ✓ Velocidade de sedimentação constante

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA

>Lei de Newton e Stokes

$$v_s = \frac{1}{18} \cdot \frac{g \cdot \rho_s - \rho_l}{\nu \cdot \rho_l} \cdot d^2$$

V_s: velocidade de sedimentação da partícula (m/s)

g: aceleração da gravidade (m/s²)

ν: viscosidade cinemática da água (m²/s)

ρ_s: densidade da partícula (kg/m³)

ρ_l: densidade do líquido (kg/m³)

d: diâmetro da partícula (m)

>Exemplo: Calcular a velocidade de sedimentação de partículas de areia, considerando:

- Diâmetro da partícula: 0,90 mm e 0,45 mm
- Densidade da partícula: 2650 kg/m³
- Densidade do líquido: 1000 kg/m³
- Viscosidade cinemática (25° C): 0,90x10⁻⁶ m²/s

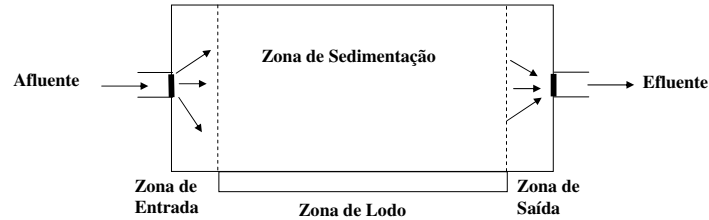
Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA

➤ Tanque de sedimentação ideal

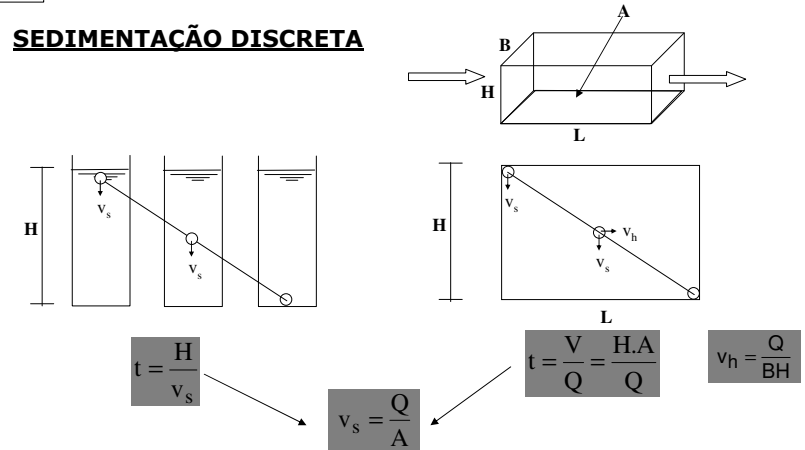
- ✓ Zona de entrada: partículas uniformemente distribuídas
- ✓ Zona de lodo: partículas removidas
- ✓ Zona de saída: partículas não removidas



Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA



- v_s : taxa de aplicação superficial (m/h ou $m^3/m^2.h$)

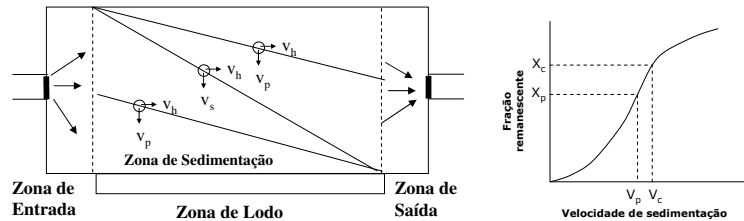
- Remoção da partícula $f(A)$

- V_s : parâmetro de projeto, obtido experimentalmente, valores de literatura.

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA



$$\text{Fração removida} = (1 - X_c) + \int_0^{X_c} \frac{v_p}{v_c} dx$$

$$\text{Fração removida} = (1 - X_c) + \frac{1}{v_c} \sum v_p \cdot dx$$

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO DISCRETA

➤ **Exemplo:** Considere os dados abaixo da distribuição de partículas de areia obtidas através de ensaios de peneiramento. Para cada fração foi calculada a velocidade média de sedimentação. Calcular a remoção total de partículas, considerando uma taxa de aplicação superficial de $2,8 m^3/m^2.min$.

Velocidade sedimentação (m/min)	Fração de sólidos remanescente
3,00	0,55
1,50	0,46
0,60	0,35
0,23	0,11
0,15	0,03

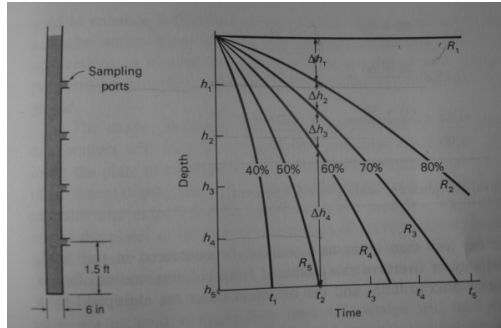
Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO FLOCULENTA

➤ Cálculo da remoção total

- ✓ Teste de sedimentação
- ✓ Remoção de alíquotas a vários intervalos de tempo



Exemplo: Dados os resultados do teste de sedimentação, determinar a remoção total de sólidos para um tempo de detenção t_2 e uma profundidade h_5

$$\text{Remoção} = \frac{\Delta h_1}{h_5} \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} + \frac{\Delta h_2}{h_5} \cdot \frac{R_2 + R_3}{2} + \frac{\Delta h_3}{h_5} \cdot \frac{R_3 + R_4}{2} + \frac{\Delta h_4}{h_5} \cdot \frac{R_4 + R_5}{2}$$

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO FLOCULENTA

Exemplo: assumindo-se os valores do teste de sedimentação abaixo, calcular a percentagem de remoção esperada para as seguintes condições:

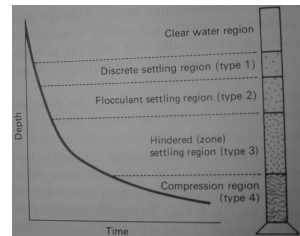
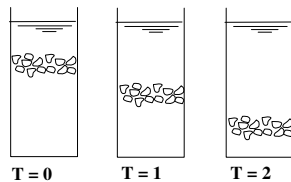
- tanque de 2,0 m de profundidade, com tempo de detenção de 1,5 h
- tanque de 2,0 m de profundidade, com tempo de detenção de 3,0 h
- tanque de 1,0 m de profundidade, com tempo de detenção de 3,0 h
- tanque de 2,5 m de profundidade, com tempo de detenção de 3,75 h

Profundidade (m)	Tempo de amostragem							
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
1	26	44	49	55	63	66	71	77
2	20	34	44	51	56	60	62	64
3	19	27	37	45	51	57	60	68

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL



- ✓ Alta concentração de sólidos (formação manto)
- ✓ Partículas tendem a uma posição fixa
- ✓ Formação de uma interface (fase líquida – sólida)
- ✓ Movimento descendente da interface

➤ Características de sedimentação da suspensão

- ✓ Grande variabilidade
- ✓ Testes de sedimentação

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL

➤ Dimensionamento baseado testes em bateladas

A taxa de aplicação superficial deve ser considerando:

- ✓ Área necessária para clarificação
- ✓ Área necessária para o espessamento do lodo (maior)
- ✓ Taxa de remoção do lodo

➤ Área para o espessamento do lodo (Método Talmadge e Fitch)

$$A = \frac{Qt_u}{H_0}$$

A: área para espessamento (m²)

Q: vazão de entrada no tanque (m³/s)

H₀: altura inicial da interface na coluna (m)

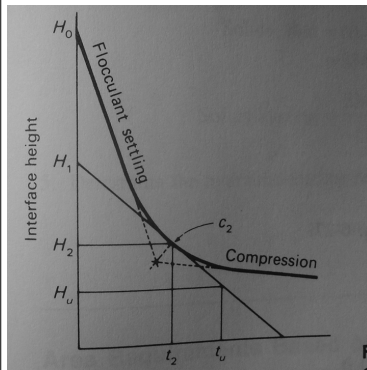
t_u: tempo necessário para alcançar determinada concentração (s)

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL

➤ Área espessamento do lodo (A_e) (Método Talmadge e Fitch)



$$A_e = \frac{Q t_u}{H_0}$$

• Determinação de t_u

$$H_u = \frac{C_0 H_0}{C_u}$$

- Traçar tangente a C_2

C_2 : determinado pela extensão da bissetriz do ponto de interseção das tangentes curva na região de sedimentação e compressão.

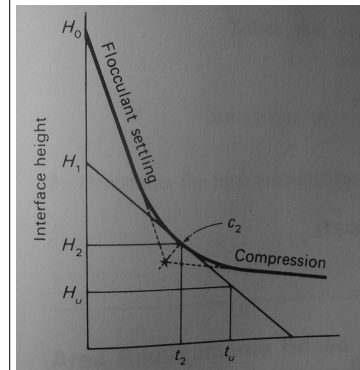
- Traçar horizontal de H_u até tangente a C_2 e ler t_u no eixo x

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL

➤ Área para clarificação (A_c) (Método Talmadge e Fitch)



$$A_c = \frac{Q_c}{V}$$

• V : velocidade de sedimentação da interface (inclinação da tangente da porção inicial da curva de sedimentação)

• Q_c : Taxa de clarificação (proporcional ao volume do líquido acima da zona crítica de lodo)

$$Q_c = \frac{Q \cdot (H_0 - H_u)}{H_0}$$

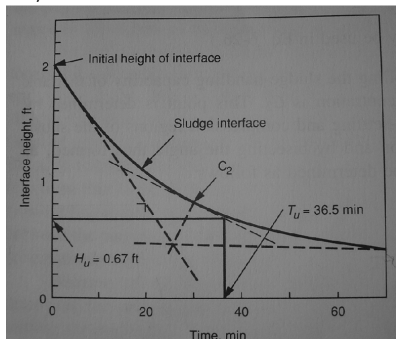
- Traçar horizontal de H_u até tangente a C_2 e ler t_u no eixo x

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL

➤ Exemplo: A curva de sedimentação abaixo foi obtida para um lodo ativado com concentração inicial de sólidos C_0 de 4000 mg/L. A altura inicial da interface H_0 na coluna de sedimentação foi de 2,0 ft. Determine a área requerida para alcançar uma concentração de sólidos C_u de 12000 mg/L, considerando uma vazão de entrada de 400 m³/d.



Área de espessamento

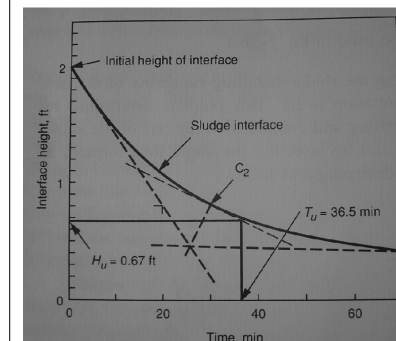
$$H_u = \frac{C_0 \cdot H_0}{C_u}$$

$$A_e = \frac{Q \cdot t_u}{H_0}$$

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL



Área de clarificação

- Velocidade de sedimentação da interface (inclinação tangente região sedimentação)

$$V = \frac{2,0 - 0,8}{20} = 0,06 \text{ ft/min} = 1,10 \text{ m/h}$$

- Taxa de clarificação

$$Q_c = Q \left(\frac{H_0 - H_u}{H_0} \right)$$

$$A_c = \frac{Q_c}{V}$$

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO ZONAL

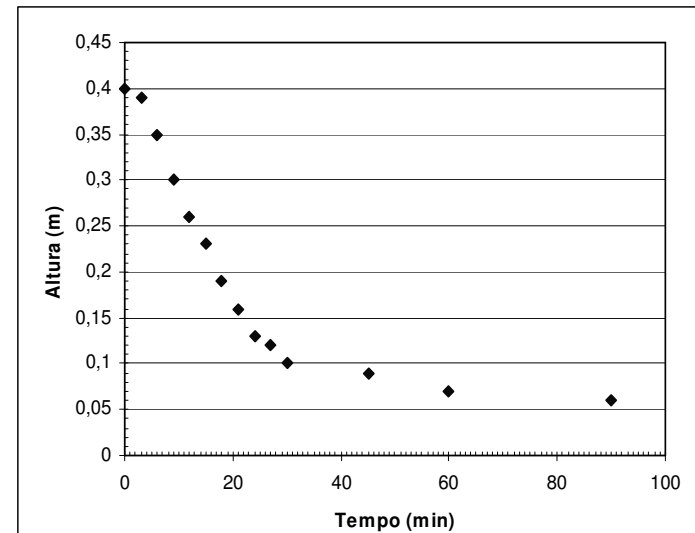
Exemplo: O teste de sedimentação de um lodo com concentração inicial de sólidos de 2900 mg/L apresentou os resultados apresentados na tabela a seguir. A altura inicial da interface H_0 na coluna de sedimentação foi de 0,40 m. Determine a área requerida para alcançar uma concentração de sólidos C_u de 10000 mg/L, considerando uma vazão de entrada de 500 m³/d.

Tempo (min)	Altura (m)
3	0,4
3	0,39
6	0,35
9	0,3
12	0,26
15	0,23
18	0,19
21	0,16
24	0,13
27	0,12
30	0,1
45	0,09
60	0,07
90	0,06

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

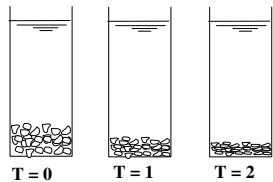
SEDIMENTAÇÃO ZONAL



Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

SEDIMENTAÇÃO POR COMPRESSÃO



- ✓ Altíssima concentração de sólidos
- ✓ Sedimentação por compressão da estrutura da partícula
- ✓ Compressão devido ao peso das partículas

✓ Volume requerido pode ser determinado por teste de sedimentação

$$H_t - H_\infty = (H_2 - H_\infty)e^{-i(t-t_2)}$$

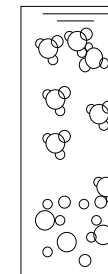
H_t : altura do lodo no tempo t
 H_∞ : altura do lodo após longo período (24 horas)
 H_2 : altura do lodo no tempo t_2
 i : constante para uma dada suspensão

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

FLOTAÇÃO

Operação unitária usada para separar partículas sólidas ou líquidas de uma fase líquida. A separação é obtida pela introdução de bolhas de gás (ar) na fase líquida. As bolhas aderem à superfície da partícula e a força de empuxo da espécie partícula-bolha é grande o bastante para promover a subida da partícula para a superfície.



- ✓ Superfície da partícula importante flotação
- ✓ Modificação das características superfície
 - ✓ Criar superfície ou estrutura com maior afinidade com as bolhas de ar
- ✓ Aditivos inorgânicos: sais alumínio e ferro, sílica ativada - flocos
- ✓ Polímeros Orgânicos: mudar a natureza da interface ar-líquido

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

► Vantagens frente a sedimentação

- ✓ Lodos mais concentrados
- ✓ Remoção de sólidos de difícil sedimentação
- ✓ Maiores taxas de aplicação superficial – menor área

► Aplicação

- ✓ Curtumes, refino de óleo, conservas, lavanderias, matadouro e frigoríficos;
- ✓ Petroquímica, papel e celulose;
- ✓ Lodos ativados – adensamento do lodo

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

TIPOS DE FLOTAÇÃO

► Flotação por ar disperso

Consiste em introduzir o ar diretamente na suspensão, através do fundo do tanque de flotação.

- ✓ Baixa eficiência na remoção de sólidos
- ✓ Recomendado na remoção de espuma

► Flotação a vácuo

Consiste na saturação da água residuária com ar:

- ✓ Diretamente em um tanque de aeração
- ✓ Permitindo a entrada de ar na sucção do bombeamento

Vácuo parcial é aplicado no sistema e o ar dissolvido passa para a forma de pequenas bolhas, promovendo assim a interação ar-partícula.

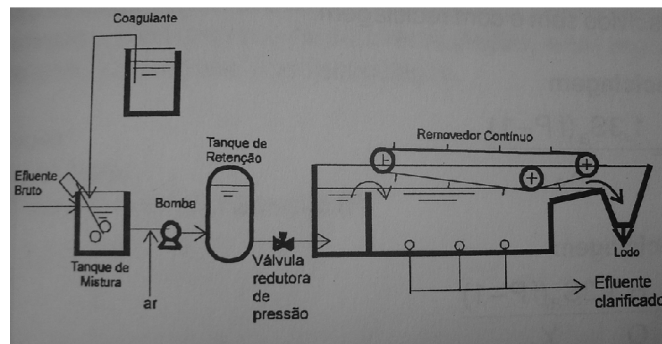
Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA SEDIMENTAÇÃO

TIPOS DE FLOTAÇÃO

► Flotação por ar dissolvido

Consiste em dissolver o ar na água residuária sob condição de elevada pressão (2-4 atm) em um tanque de retenção, seguido do lançamento no tanque de flotação, controlado através de uma válvula de redução de pressão.



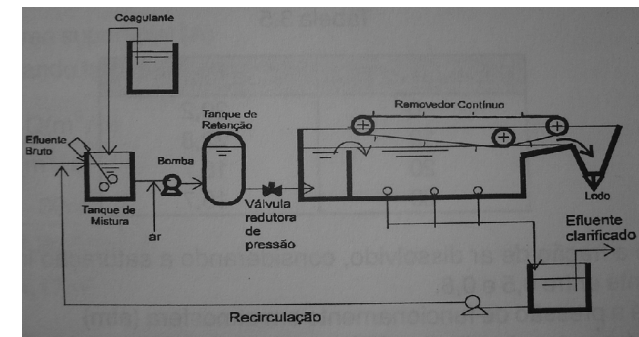
Tanque de flotação sem recirculação

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

TIPOS DE FLOTAÇÃO

► Flotação por ar dissolvido



Tanque de flotação com recirculação

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

> Dimensionamento – Fatores importantes

- ✓ Concentração das partículas
- ✓ Quantidade de ar utilizado
- ✓ Velocidade ascendente das partículas
- ✓ Taxa de aplicação de sólidos

Testes bancada e piloto



> Critérios de dimensionamento

$$\text{Relação } \frac{A}{S} \left(\frac{\text{volume ar}}{\text{massa sólidos}} \right)$$

Variável para cada tipo de suspensão

- ✓ S - constante
- ✓ A - baixa - flotação parcial
- ✓ A - elevada - agitação excessiva

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

DIMENSIONAMENTO FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

> Determinação da pressão (P) de operação

$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot s_a \cdot (fP - 1)}{X_0} \quad (\text{sem recirculação})$$
$$\frac{A}{S} = \frac{1,3 \cdot s_a \cdot (fP - 1) \cdot R}{X_0 \cdot Q} \quad (\text{com recirculação})$$

- A/S: razão ar/sólidos (mL ar/mg sólido)
- s_a : solubilidade do ar (mL/L)
- f: fração ar dissolvido na pressão P (0,5)
- P: pressão do sistema (atm)
- R: razão de recirculação
- Q: vazão afluente

> Área requerida

$$A = \frac{Q}{I} \quad (\text{sem recirculação})$$
$$A = \frac{Q + R}{I} \quad (\text{com recirculação})$$

- I: taxa de aplicação superficial ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$)
4,8 – 9,6 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
- 0,47 – 0,96 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ (espessamento lodo)

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS

ASPECTOS TEÓRICOS DA FLOTAÇÃO

DIMENSIONAMENTO FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO

Exemplo: Dimensionar um sistema de flotação com e sem recirculação, cuja vazão afluente é de 30 m^3/h , contendo sólidos em suspensão em concentração igual a 300 mg/L. A relação ótima A/S encontrada em escala piloto é de 0,02 $\text{mL}_{\text{ar}}/\text{mg}_{\text{sólido}}$ e a temperatura de operação de 30°C ($s_a = 15,7 \text{ mL/L}$). Adotar $f = 0,5$ (mais conservador). Adotar taxa aplicação superficial de 7,2 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$.

Exemplo: Dimensionar um espessador com e sem recirculação de um lodo ativado, assumindo as seguintes condições:

- Vazão afluente: 400 m^3/d
- A/S ótima = 0,008 mL/mg
- concentração de sólidos = 3000 mg/L
- Solubilidade do ar = 18,7 mL/L
- Fração de ar em P = 0,5
- Taxa de aplicação superficial = 0,008 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{min}$

Prof. Carlos Ernando da Silva - Tratamento de Resíduos e Impactos Ambientais - UFSM/CT/HDS