

Separação sólido-líquido

UC Mecânica de Fluidos / 2º ciclo de Eng. Ambiente
M.ª Rosário Carneira / Departamento de Eng.º Biosistemas



Mecânica de Fluidos



Separação sólido-líquido / 2

Dimensionamento de tanques de sedimentação



Bibliografia:

- Svarovsky, L. 2000. *Solid-liquid separation*. Butterworth Heinemann, 4th edition;
- Tchobanoglous, Burton, Stensel. 2003. *Wastewater Engineering, treatment and reuse*. McGraw-Hill.

1/33

Separação sólido-líquido

UC Mecânica de Fluidos / 2º ciclo de Eng. Ambiente
M.ª Rosário Carneira / Departamento de Eng.º Biosistemas


Aplicação prática da teoria da separação sólido-líquido

Tanques de sedimentação gravítica

Conceitos

- Sedimentação devida à acção da **força gravítica**;
- O factor decisivo para o processo é a **diferença de densidade** entre as partículas sólidas e o líquido;
- É o equipamento de separação sólido-líquido de **custo mais baixo**.

- Diferença insuficiente entre densidades e/ou
- Dimensão das partículas muito pequena



- Tempo de retenção hidráulica resulta muito longo
- Dimensões do tanque economicamente inviáveis

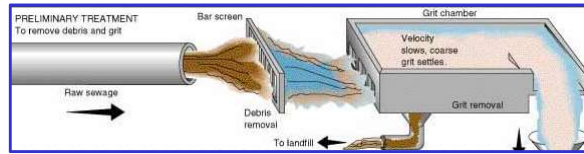
Aumento artificial da dimensão das partículas

FLOCULAÇÃO

2/33

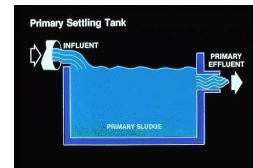
❑ **Aplicação**

➔ **Pré tratamento:** para separação de areias e saibro (Tipo I)



➔ **Tratamento primário**
para separação de partículas floculadas (Tipos I, II)

- limo,
- $Al(OH)_3$, $CaCO_3$, $Mg(OH)_2$)
- algum material orgânico



Nos tanques de sedimentação primários *cerca de metade do material orgânico em suspensão sedimenta*, originando as lamas primárias. O efluente primário vai para o tratamento secundário (biológico)



❑ **Tipos de tanques de sedimentação (quanto ao modo de alimentação)**

➤ **Intermitentes / contínuos**

- Intermitentes: Armazenam água durante um período de tempo, mantendo-a em repouso enquanto ocorre o processo de sedimentação
- Contínuos: A velocidade do escoamento é reduzida na zona de alimentação, nunca chegando a anular-se a energia cinética. A sedimentação das partículas ocorre durante o escoamento da água para a saída do tanque.

❑ **Tipos de tanques de sedimentação (quanto à forma)**

➤ **Rectangulares / circulares**

- os tanques rectangulares, com fluxo horizontal paralelo, são preferíveis em relação aos circulares, com fluxo horizontal e radial, devido à maior estabilidade e controlo de grandes escoamentos

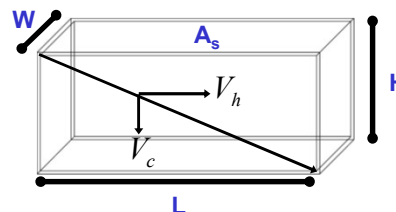
- Dimensões típicas para dimensionamento de tanques primários de sedimentação gravítica

	Unidades SI	intervalo	Valor típico
Rectangulares			
Profundidade	m	2.5 - 5	4.0
Comprimento	m	15 - 100	25-40
Largura	m	3 - 30	5-10
Circulares			
Profundidade	m	3 - 5	4.5
Diâmetro	m	3 - 60	12 - 45
Declive do fundo	m/m	1/16 – 1/6	1/12

- Rectangulares (fluxo horizontal paralelo – trajectória das partículas é um segmento de recta)

Outros valores típicos de projecto

- ✓ Tempo de retenção hidráulica, θ : 2 - 6 h
- ✓ Taxa de vazão (carga hidráulica de superfície), q_o : $0.5 - 3 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- ✓ L / W mínimo ≈ 3 (pode ir até 6)
- ✓ Declive: 1 %
- ✓ Velocidade:
 - Componente vertical u_v : $0.01 - 0.05 \text{ cm s}^{-1}$
 - Componente horizontal u_h : $< 0.5 \text{ cm s}^{-1}$

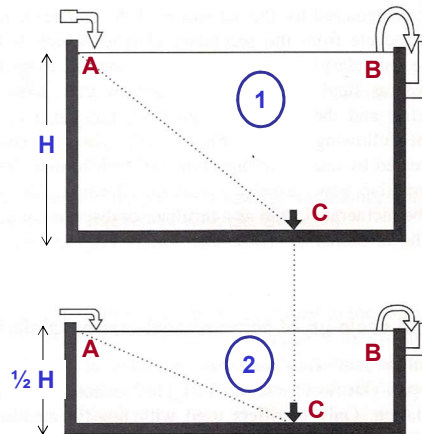


Separação sólido-líquido

Teoricamente a única variável de dimensionamento que afecta a performance de um tanque de sedimentação é a área da superfície, A_s , independentemente da sua forma e profundidade

Verifica-se que a mesma partícula que entra no lado A atinge o fundo, no mesmo ponto C, nos dois tanques

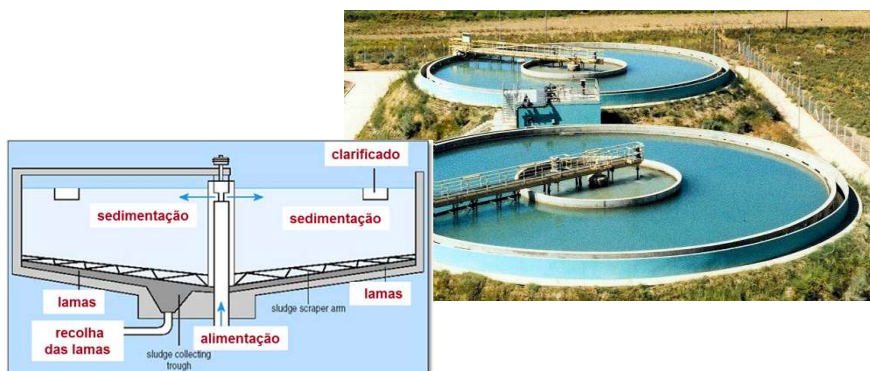
Porque, em 1, embora a partícula tenha o dobro da distância até sedimentar, a componente horizontal da velocidade é metade da verificada em 2, anulando o efeito da diferença de profundidade



Separação sólido-líquido

➤ Circulares (fluxo entra pelo centro e é escoado radialmente em direcção à periferia do tanque. A componente horizontal da velocidade diminui continuamente à medida que as partículas se afastam do centro. Portanto, a trajectória é uma parábola.)

- ✓ Tempo de retenção hidráulica, θ : 2 - 6 h
- ✓ Taxa de vazão, q_0 : 0.5 - 3 $\text{m}^3 \text{h}^{-1} \text{m}^{-2}$



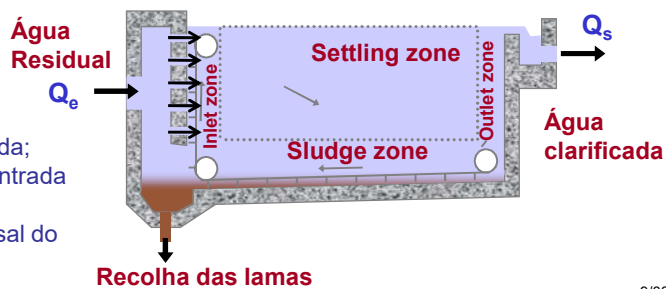
Sedimentação discreta (partículas individuais que mantêm inalteradas as suas características físicas: forma, tamanho e densidade => $\phi > 1$ ou $5 \mu\text{m}$)

Um tanque de sedimentação rectangular ideal é dividido em quatro zonas:

- **Zona de alimentação:** o escoamento é horizontal e uniformemente distribuído por toda a secção transversal;
- **Zona de sedimentação:** onde se assume ocorrer sedimentação das partículas, à medida que o escoamento ocorre em direcção à zona de escoamento;
- **Zona de saída:** o escoamento irá sair pelo descarregador;
- **Zona de retirada das lamas:** onde é recolhido o material que sedimenta, assumindo-se que não volta a entrar em suspensão.

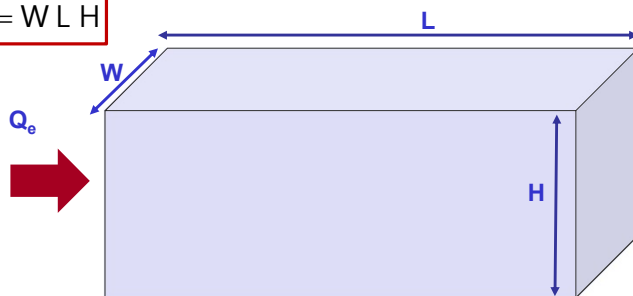
$$u_e = \frac{Q_e}{A_t}$$

Sendo:
 Q_e o caudal de entrada;
 u_e a velocidade de entrada
 A_t a secção transversal do tanque



Dimensões do tanque de sedimentação rectangular

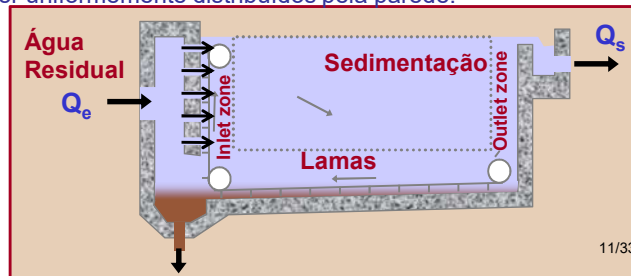
$$\begin{aligned} A_t &= W H \\ A_s &= W L \\ \nabla &= W L H \end{aligned}$$



- **Zona de entrada:** o escoamento é horizontal e uniformemente distribuído por toda a secção transversal

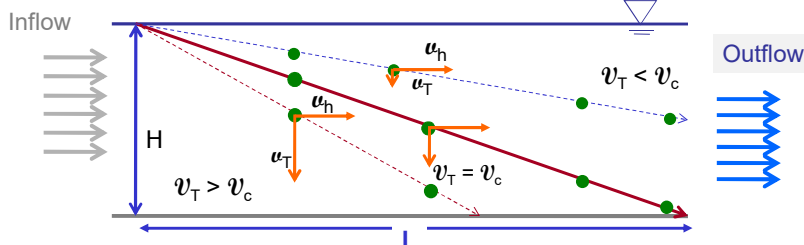
Parede difusora

- deve estar localizada aproximadamente a 2 m da conduta que transporta a água até ao tanque;
- a perda de carga através dos orifícios deve ser 4 a 5 vezes a altura cinética do escoamento;
- as velocidades através dos orifícios devem ser cerca de 0.2 a 0.3 m/s;
- os orifícios devem apresentar diâmetros de 0.1 a 0.2 m, espaçados de 0.25 a 0.6 m.
- os orifícios devem ser uniformemente distribuídos pela parede.



11/33

➤ **Zona de sedimentação**



- ❑ Cada partícula desloca-se no tanque de sedimentação com uma velocidade que apresenta duas componentes: horizontal (u_h) e vertical (u_v)

$$u_v = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\mu} = u_T \quad \text{e} \quad u_h = u_e = \frac{Q_e}{A_t}$$

- ❑ **Velocidade crítica de sedimentação:** é a velocidade terminal mínima que devem ter as partículas de um determinado D, para que sejam 100% removidas da suspensão. Depende da área da superfície do tanque e da taxa de vazão do tanque (ou carga hidráulica de superfície).

- ❑ Num determinado tanque de sedimentação onde a velocidade crítica é u_c :

- Todas as partículas com $u_T \geq u_c$ são removidas
- Apenas algumas com $u_T < u_c$ são removidas

Porcentagem de remoção

$$P_{rem} = \frac{u_T}{u_c} \times 100\%$$

Separação sólido-líquido

Trajectória das partículas individuais (cor de rosa) no tanque de sedimentação

Quando as partículas atingem o fundo do tanque $t = \theta$

$$\left. \begin{aligned} L &= t u_h \\ H &= t u_T \end{aligned} \right\} \begin{cases} L = \theta u_h \Leftrightarrow \theta = \frac{L}{u_h} \\ H = \theta u_T \Leftrightarrow \theta = \frac{H}{u_T} \end{cases}$$

Logo, $\frac{LWH}{Q_e} = \frac{H}{u_T} \Leftrightarrow u_T = \frac{Q_e}{A_s} = q_o$

$\theta = \frac{v}{Q_e} = \frac{LWH}{Q_e}$

q_o é a taxa de vazão (ou carga hidráulica de superfície) ($m s^{-1}$) e corresponde à velocidade crítica de sedimentação para o tanque em causa (pois depende da área e o caudal de entrada) e que determina a eficiência de remoção do equipamento.

Num tanque de sedimentação rectangular de escoamento horizontal a taxa de vazão (ou carga hidráulica de superfície) é $17 m^3 d^{-1} m^{-2}$. Pretende-se remover partículas que apresentam velocidades terminais de $0.1, 0.2$ e $1 mm s^{-1}$. Qual a percentagem de remoção a esperar para cada partícula, considerando que o tanque se comporta de forma ideal?

$$q_0 = 17 \frac{m^3}{d m^2} \times \frac{1000 mm}{1 m} \times \frac{1 d}{24 \times 60 \times 60 s} = 0.2 mm s^{-1} \quad (= u_c)$$

1) Para as partículas com $u_t = 0.1 mm s^{-1}$

Como a velocidade terminal das partículas é inferior à velocidade terminal crítica, apenas algumas partículas vão sedimentar

$$P_{rem} = \frac{v}{v_c} \times 100 = \frac{0.1}{0.2} \times 100 = 50 \%$$

2) Para as partículas com $u_t = 0.2 mm s^{-1}$

$$P_{rem} = \frac{v}{v_c} \times 100 = \frac{0.2}{0.2} \times 100 = 100 \% \quad (\text{idealmente})$$

3) Para as partículas com $u_t = 1 mm s^{-1}$

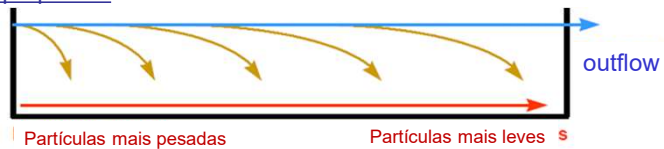
Sendo a velocidade superior à crítica, sedimentam todas as partículas

A velocidade de sedimentação crítica, v_c é determinada por:

(Também chamada de taxa de vazão ou carga hidráulica de superfície)

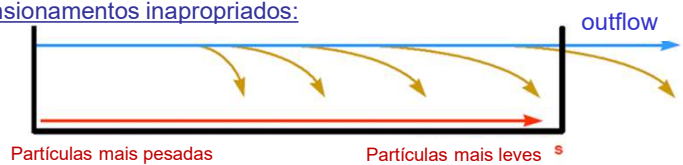
- Caudal de entrada (Q_e)
- Área da superfície do tanque (A_s)
- Tempo de retenção hidráulica (θ)
- Altura da zona de sedimentação (H)

Dimensionamento apropriado:

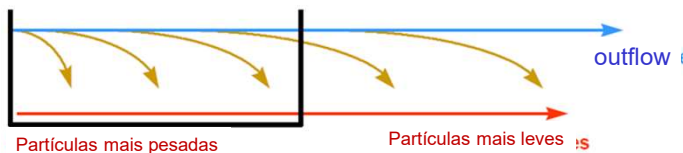


Exemplo de dimensionamentos inapropriados:

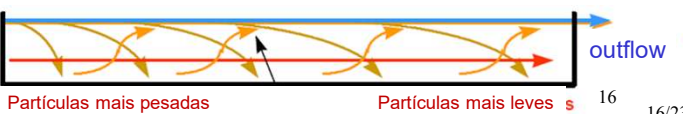
Caudal muito elevado



L muito pequeno



H muito pequeno



□ Dimensionamento de um tanque de sedimentação

- *Determinação da carga hidráulica de superfície, q_o*
 - Devemos saber a distribuição de diâmetros das partículas presentes na suspensão a separar (análise laboratorial de uma amostra);
 - Podemos então decidir qual é a velocidade terminal da partícula mais pequena a ser separada a 100 %. Esta velocidade terminal u_T será a velocidade crítica do tanque em dimensionamento u_c .
 - a u_c pode ser posteriormente ajustada se verificarmos que o tempo de detenção não está dentro dos limites típicos para o dimensionamento;
- *Determinação da área superficial do tanque, A_s (m^2)* $u_T = u_c = q_o = \frac{Q_e}{A_s}$

Exemplo: Determine a área superficial de um tanque de sedimentação que separe 100 % de partículas com diâmetro = 90 μm , com massa volúmica = 8600 $kg\ m^{-3}$. O tanque deve receber o caudal de 402 x 10³ L min⁻¹ de uma água residual com $\rho = 2900\ kg\ m^{-3}$ e viscosidade dinâmica de 0.01 Pa.s.

$u_T = 0.00295\ m\ s^{-1} >$ limite superior do intervalo de valores aconselhados

Então $q_o =$ limite superior = 0.00083 $m\ s^{-1}$

$$q_o = \frac{Q_e}{A_s} \Leftrightarrow 0.00083 = \frac{6.7}{A_s} \Leftrightarrow A_s = 8040\ m^2$$

17

- *Determinação da largura e do comprimento do tanque*
- Para impedir o *short circuiting*, deve ser garantida uma razão mínima comprimento/ largura (L:W) de 3:1. A preferida é 6:1 (Kawamura, 2000).
- L mínimo = 3W

Para o exemplo anterior

$$\begin{cases} A = L W \\ L = 3 W \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A = 3 W^2 \\ L = 3 W \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 8040 = 3 W^2 \\ L = 3 W \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} W = 51.8\ m > 30\ m \\ L = 155.4\ m \end{cases}$$

Solução: aumentar o nº de tanques

Para 4 tanques $A = 2010\ m^2$; $W = 26\ m$; $L = 78\ m$

18

A partir daqui temos duas opções

Assumimos um tempo de retenção hidráulica típico de dimensionamento (ver quadro)

- *Determinação do volume*

$$Q_e = \frac{V}{\theta} \Leftrightarrow V = Q_e \theta$$

- *Determinação da profundidade*

$$V = A_s H \quad (\text{fazer verificação de } H)$$

Assumimos uma profundidade para o tanque típica de dimensionamento (ver quadro)

- *Determinação do volume*

$$V = A_s H$$

- *Determinação do tempo de retenção hidráulica :*

$$V = Q_e \theta \quad (\text{fazer verificação de } \theta)$$

Admitindo $H = 4 \text{ m}$

$$\theta = \frac{2686.7 \times 4}{2.23} = 1.34 \text{ h}$$

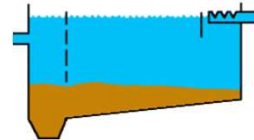
- Os cálculos apresentados anteriormente devem ter por base:

- os limites apresentados na tabela e
- os seguintes critérios e regras

❖ **Critérios e regras para o dimensionamento de tanques de sedimentação**

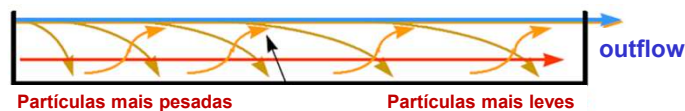
- ✓ turbulência mínima
- ✓ velocidade constante
- ✓ Taxa de vazão, q_o , deve ser baixa (para capturar partículas de pequenas dimensões)
- ✓ A_s deve ser grande

- A variável de dimensionamento principal é a **carga hidráulica de superfície**;
- Deve ser deixada altura suficiente para o **depósito das lamas** (quando existe equipamento mecânica para a remoção das lamas devemos garantir cerca de 3 a 5 m de profundidade);
- A profundidade é uma variável de controlo da simulação por causa do **scouring**;
- Tanques com comprimento maior do que 30 m são susceptíveis aos efeitos do vento, exigindo a instalação de quebra ventos. **Muretes deverão ser colocados de 30 em 30 m**.



Verificações importantes a fazer na zona de sedimentação

a) Verificação da componente horizontal da velocidade, u_e (scouring)



De modo a evitar que as partículas já sedimentadas entrem de novo em suspensão, a velocidade horizontal deve ser mantida abaixo de um valor denominado de velocidade de arrastamento (scour). Camp (1946) apresenta a seguinte fórmula de cálculo:

$$u_{sc} = \left(\frac{8 K (d_p - 1) g \phi_p}{f} \right)^{1/2}$$

Onde

- K = constante (0.04 para areia e 0.06 para outras partículas de maior adesividade)
- f = factor de fricção de Darcy-Wiesbach (0.02 e 0.03)

Após o “pre-cálculo” da área da secção transversal do tanque, há que verificar se:

$$u_h < u_{sc}$$

Se $u_h \geq u_{sc}$ o que fazer?

- Aumentar a secção transversal do tanque (H ou W)
- Diminuir Q_e , ou seja, colocar outro tanque em paralelo

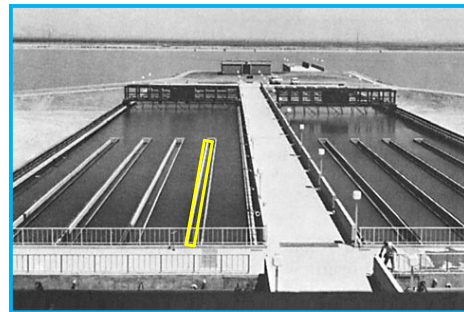
Separação sólido-líquido

➤ **Zona de saída**

O componente principal é um **descarregador** que controla o nível de água no tanque e o caudal de saída do tanque.



Pretende-se que o descarregador tenha um comprimento grande para maior estabilidade hidráulica do sistema.



- O descarregador é constituído por **canaletes desenvolvendo-se paralelamente ao comprimento do tanque**, de modo a aumentar o comprimento do descarregador.
- O comprimento dos canaletes deve ser **1/3 do comprimento do tanque**.
- Os canaletes são uniformemente espaçados ao longo da largura do tanque.

23/33

Senaração sólido-líquido



24/33

Separação sólido-líquido



Separação sólido-líquido



➤ Zona de saída

- Os canaletes terminam em descarregadores em V.
- O muro de fundo termina num descarregador rectangular de soleira espessa.



□ Dimensionamento do descarregador

Carga hidráulica sobre o descarregador, CH_{desc}

$$CH_{desc} = \frac{Q_e}{W_{desc}} \quad \leftarrow \text{Para que o nível de água no tanque se mantenha constante}$$

Sendo

- W_{desc} a largura do descarregador (m);
- Q_e o caudal de entrada ($m^3 d^{-1}$);
- CH_{desc} a carga hidráulica sobre o descarregador ($m^3 d^{-1} m^{-1}$)

CH_{desc} está limitado a um intervalo de 100 a 320 $m^3 d^{-1} m^{-1}$

Então o método de dimensionamento é o seguinte:

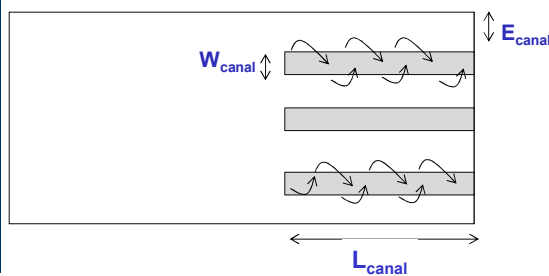
- Impor um valor para CH_{desc} dentro do intervalo aconselhado;
- Calcular W_{desc} ;
- Se $W_{desc} > W_{tanque}$ proceder ao dimensionamento dos canaletes:

➤ Comprimento dos canaletes: $L_{canal} = \frac{1}{3} L_{tanque}$

➤ Nº de canaletes: $N^o_{canal} = \frac{W_{desc}}{2 L_{canal}}$

➤ Largura dos canaletes: W_{canal} deve variar entre 0.25 e 0.5 cm.

➤ Espaçamento entre os canaletes: $E_{canal} = \frac{W_{tanque} - W_{canal} N^o_{canal}}{N^o_{canal} + 1}$



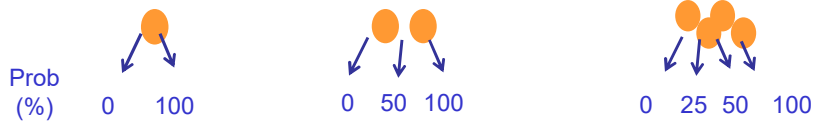
□ Curva de eficiência de separação de um equipamento, $G(x)$

A curva de eficiência de separação tem um carácter de probabilidade.

Fornece a probabilidade de uma partícula de qualquer dimensão x se separar do fluido

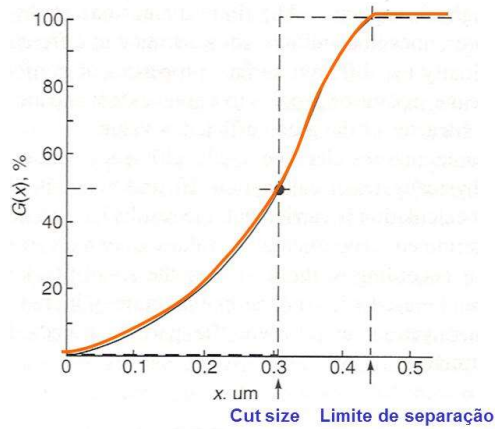
Verifica-se esta probabilidade (e não certeza) devido ao facto de as diferentes partículas, com as mesmas dimensões, experimentarem diferentes condições quando atravessam o separador.

Partículas da mesma dimensão:



Obtêm-se assim uma função distribuição de probabilidades que traduz a curva de eficiência de separação do equipamento

Exemplo de curva de eficiência de separação de um centrifugador



Curva de eficiência de separação, $G(x)$: Fornece a probabilidade de uma partícula de qualquer dimensão x se separar do fluido, para um equipamento específico

Separação sólido-líquido

UC Mecânica de Fluidos / 2º ciclo de Eng. Ambiente
M.ª Rosário Carneira / Departamento de Eng.ª Biossistemas

➤ **Pontos importantes da curva de eficiência de separação (diâmetros):**

- ➔ **Cut size , X_{50}**
É a dimensão de partícula, cuja população tem 50 % de probabilidade de separação. Portanto, para o cut size (diâmetro) $G(X) = 0.5$
- ➔ **Limite de separação, $X_{máx}$**
É a maior dimensão de partícula que sai no overflow (tamanho da maior partícula que tem chance de escapar à separação). Usa-se geralmente X_{98} , para limite de separação.

Exemplo de curva de eficiência de separação de um centrifugador

31/33

X_{98} é o primeiro diâmetro (diâmetro mínimo) para o qual sedimenta 100% da população de partículas. Todas as populações com diâmetros superiores sedimentam a 100 %.

Separação sólido-líquido

UC Mecânica de Fluidos / 2º ciclo de Eng. Ambiente
M.ª Rosário Carneira / Departamento de Eng.ª Biossistemas

➤ Os valores da curva de separação de um tanque de sedimentação gravítica dependem:

- ➔ da velocidade terminal da partícula de diâmetro ϕ ;
- ➔ da área da superfície do tanque e
- ➔ do caudal de entrada no tanque

$$G(x) = u_T \frac{A_s}{Q_e} \quad \text{Onde} \quad u_T = \frac{g(\rho_p - \rho_w)d_p^2}{18\mu} \quad \text{ou} \quad u_T = \sqrt{\frac{4g}{3C_v} \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - 1 \right)} \phi_p$$

Em teoria devemos verificar qual o regime da partícula para relacionarmos correctamente a velocidade terminal com o diâmetro

↑

Método iterativo ou método de Heywood

32/33

Caracterização da amostra da água residual a separar:

- Tamanho das partículas
- Percentagem de sólidos
- Massa volúmica do sólido
- Massa volúmica do líquido

Vários factores afectam o desempenho de um tanque de sedimentação afastando-o de um tanque ideal.

Incluem a turbulência do escoamento, a perda de energia na entrada no tanque, correntes de convecção, efeitos do vento, movimento do equipamento de remoção das lamas.

➤ **Turbulência:**

A sua ocorrência está associada à componente horizontal da velocidade. Deve ser controlada através dos parâmetros adimensionais de Reynolds e de Froude

➤ **Perda de energia ou de carga na zona de admissão do caudal:**

A velocidade com que a água chega à entrada do tanque deve ser diminuída de modo a evitar o efeito de jacto na entrada, o que vai alterar as condições de sedimentação das partículas. A aplicação da perda de carga correcta exige o seguimento das regras para a dimensão e localização dos orifícios na parede de entrada.

➤ **Efeito das correntes de convecção:**

Dão ao origem a um fenómeno conhecido como *short circuiting*. Caracteriza-se pelo facto de o escoamento no tanque não ser uniforme, podendo ser transportadas directamente para região de saída partículas que ainda não foram separadas.

As causas mais frequentes para o *short circuiting* estão associadas a alterações na densidade dos materiais. São elas: o aquecimento da superfície da água pela exposição solar, a entrada repentina de caudal a uma temperatura superior à do líquido existente no tanque e o aumento repentino da quantidade de sólidos em suspensão.

➤ **Efeito do vento:**

Em adição ao *short circuiting*, o efeito de ventos fortes pode contribuir para a ocorrência de *scouring*. Solução: colocação de barreiras de vento a cada 30 m do comprimento do tanque.