

## 12– FILTRAÇÃO

### 12.1 DEFINIÇÕES:

**FILTRAR** CONSISTE EM SEPARAR MECÂNICAMENTE AS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE UMA SUSPENSÃO LÍQUIDA COM O AUXÍLIO DE UM LEITO POROSO.

A **SEPARAÇÃO DE POEIRAS** ARRASTADAS PELOS GASES UTILIZANDO TECIDOS É TAMBÉM CONHECIDA INDUSTRIALMENTE COMO FILTRAÇÃO.

QUANDO SE FORÇA A SUSPENSÃO ATRAVÉS DO LEITO, O SÓLIDO DA SUSPENSÃO FICA RETIDO SOBRE O **MEIO FILTRANTE**.

FORMANDO UM DEPÓSITO QUE SE CHAMA **TORTA**, CUJA ESPESSURA VAI AUMENTANDO À MEDIDA QUE A OPERAÇÃO TRANSCORRE.

O LÍQUIDO QUE PASSA ATRAVÉS DO LEITO É O **FILTRADO**.

NA FILTRAÇÃO É A FASE LÍQUIDA QUE SE MOVIMENTA ATRAVÉS DO SÓLIDO ESTACIONÁRIO, ENQUANTO QUE NA DECANTAÇÃO É O SÓLIDO QUE SE MOVIMENTA ATRAVÉS DO LÍQUIDO.

EM PRINCÍPIO A FILTRAÇÃO É UMA ALTERNATIVA À DECANTAÇÃO, À CENTRIFUGAÇÃO E A PRENSAGEM.

O CAMPO ESPECÍFICO DA FILTRAÇÃO É:

- SEPARAÇÃO DE SÓLIDOS RELATIVAMENTE PUROS DE SUSPENSÕES DILUIDAS.
- CLARIFICAÇÃO TOTAL DE PRODUTOS CONTENDO POUCO SÓLIDO.
- ELIMINAÇÃO TOTAL DO LÍQUIDO DE UMA LAMA ESPESSADA.

## 12.2 FORÇA PROPULSORA PARA A FILTRAÇÃO

A FORÇA PROPULSORA PARA A OPERAÇÃO VARIA DE UM TIPO DE FILTRO PARA OUTRO, PODE SER:

PESO PRÓPRIO DA SUSPENSÃO

PRESSÃO APLICADA SOBRE O LÍQUIDO.

VÁCUO.

UMA FORÇA CENTRÍFUGA.

AO CONTRÁRIO DO QUE COMUMENTE PENSA-SE OS POROS DO MEIO FILTRANTE NÃO PRECISAM SER NECESSÁRIAMENTE MENORES DO QUE AS PARTÍCULAS DO SÓLIDO DA SUSPENSÃO.

OS CANAIS DO MEIO FILTRANTE SÃO TORTUOSOS, IRREGULARES E MESMO QUE SEU DIÂMETRO SEJA MAIOR DO QUE O DAS PARTÍCULAS SÓLIDAS. QUANDO A OPERAÇÃO COMEÇA ALGUMAS PARTÍCULAS FICAM RETIDAS POR ADERÊNCIA E TEM INÍCIO A FORMAÇÃO DA TORTA, QUE É O VERDADEIRO LEITO POROSO PROMOTOR DA SEPARAÇÃO.

A PROVA DISSO É QUE AS PRIMEIRAS PORÇÕES DE FILTRADO SÃO GERALMENTE TURVAS.

## 12.3 MEIO FILTRANTE

HÁ MUITA VARIEDADE DE LEITO FILTRANTE USADO NA INDÚSTRIA:

LEITOS GRANULARES SOLTOS: FEITOS DE AREIA, CARVÃO BRITADO, PEDREGULHO, ESCÓRIA, CALCÁREO, COQUE, CARVÃO DE MADEIRA.

USA-SE PARA CLARIFICAR SUSPENSÕES DILUIDAS.

LEITOS RÍGIDOS: SÃO FEITOS SOB A FORMA DE TUBOS POROSOS DE AGLOMERADOS DE QUARTZO OU ALUMINA (PARA A FILTRAÇÃO DE ÁCIDOS), DE CARVÃO POROSO (PARA SOLUÇÕES DE SODA E LÍQUIDOS AMONIACAIS) OU BARRO E CAULIM COZIDOS A BAIXA TEMPERATURA (USADOS NA CLARIFICAÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL). A DESVANTAGEM É A FRAGILIDADE, NÃO PODEM SER USADOS EM DIFERENÇAS DE PRESSÃO MAIORES QUE 5 atm.

TELAS METÁLICAS: SÃO USADAS NOS “STRAINERS” (COADORES) DAS LINHAS DE CONDENSADO ANTES DOS PURGADORES PARA RETER FERRUGEM E OUTROS DETRITOS QUE POSSAM ATRAPALHAR O FUNCIONAMENTO DOS PURGADORES. UTILIZAM-SE TAMBÉM EM OUTROS FILTROS SIMPLES.

PODEM SER DE CHAPA PERFURADA OU DE TELAS DE AÇOS DIVERSOS.

TECIDOS UTILIZADOS INDUSTRIALMENTE: ELES SÃO UM MEIO FILTRANTE MUITO COMUM.

TECIDOS VEGETAIS COMO DE ALGODÃO, DE JUTA (PARA ÁLCALIS FRACOS), CÂNHAMO, PAPEL.

TECIDOS DE ORIGEM ANIMAL COMO A LÃ E A CRINA (PARA ÁCIDOS FRACOS)

MINERAIS: LÃ DE ROCHA, E LÃ DE VIDRO, PARA ÁGUA DE CALDEIRAS.

PLÁSTICOS: POLIETILENO, POLIPROPILENO, PVC, NYLON, TEFLON, POLIESTER.

MEMBRANAS SEMI-PERMEÁVEIS: COMO O PAPEL PERGAMINHO, AS BEXIGAS ANIMAIS, QUE SÃO USADAS EM OPERAÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA: DIÁLISE E ELETRO-DIÁLISE.

MEMBRANAS PARA OSMOSE REVERSA: SÃO MEMBRANAS SEMIPERMEÁVEIS FEITAS DE ACETATO DE CELULOSE, POLIAMIDAS (NYLONS) E TEFLONS.

#### 12.4 TIPOS DE FILTROS:

##### 12.4.1 FILTROS DE LEITO POROSO GRANULAR:

BAIXO CUSTO DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO, PORÉM OCUPAM ÁREA GRANDE DEVIDO A SUA BAIXA VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO.

A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO VARIA ENTRE 0,08 E 0,20 m/min, ISTO É A CAPACIDADE VARIA ENTRE 80 E 200 litros/min POR METRO QUADRADO. UM VALOR MUITO INDICADO PARA ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS É 167 litros/min por cada m<sup>2</sup>, com um só meio filtrante.

COM DOIS MEIOS FILTRANTES PODE CHEGAR A 250 E OS MULTI MEIOS FILTRANTES ENTRE 250 E 625 litros/min por m<sup>2</sup>.

A VELOCIDADE DE LAVAGEM É DA ORDEM DE 0,60 m/min, E NÃO DEVE EXCEDER A VELOCIDADE CRÍTICA DE FLUIDIZAÇÃO DO LEITO QUANDO FOR CONSTITUIDO DE PARTÍCULAS SOLTAS.

GERALMENTE USA-SE COM VAZÃO EQUIVALENTE A 7 A 9 VEZES A TAXA DE FILTRAÇÃO.

##### 12.4.2 FILTROS PRENSA:

PODEM SER DE CÂMARA OU DE PLACAS E QUADROS.

A FILTRAÇÃO SE DÁ PELA AÇÃO DE UMA PRESSÃO EXERCIDA SOBRE A SUSPENSÃO NO INTERIOR DAS CÂMARAS.

O FILTRO PRENSA DE CÂMARAS É ASSIM, DENOMINADO PORQUE AS PLACAS, SENDO REBAIXADAS NA PARTE CENTRAL, FORMAM CÂMARAS QUANDO JUSTAPOSTAS.

CADA PLACA TEM UM FURO CENTRAL. ENTÃO QUANDO A PRENSA ESTÁ MONTADA OS FUROS FORMAM UM CANAL ATRAVÉS DO QUAL A SUSPENSÃO É ALIMENTADA NAS DIVERSAS CÂMARAS.

AS PLACAS SÃO REVESTIDAS COM LONAS QUE TAMBÉM TEM UM FURO CENTRAL COINCIDENTE COM OS DAS PLACAS.

O FILTRO PRENSA DE PLACAS E QUADROS, AS PLACAS SÃO QUADRADAS COM FACES PLANAS E BORDAS LEVEMENTE RESSALTADAS.

DE CADA LADO DE UM QUADRO, HÁ UMA LONA QUE ENCOSTA NA PLACA CORRESPONDENTE.

O FILTRADO ATRAVESSA AS LONAS COLOCADAS DE CADA LADO DOS QUADROS E PASSA PARA AS PLACAS, SOBRE CUJA SUPERFÍCIE ESCOA ATÉ CHEGAR AOS FUROS DE SAÍDA NO CANTO INFERIOR OPOSTO AO CANAL DE ENTRADA DA SUSPENSÃO NOS QUADROS.

#### VANTAGENS DOS FILTROS PRENSA

- CONSTRUÇÃO SIMPLES, ROBUSTA E ECONÔMICA
- GRANDE ÁREA FILTRANTE POR UNIDADE DE ÁREA DE IMPLANTAÇÃO.
- PODE-SE AUMENTAR OU DIMINUIR O NÚMERO DE ELEMENTOS PARA VARIAR A CAPACIDADE.
  
- NÃO TEM PEÇAS MÓVEIS
- OS VAZAMENTOS SÃO DETECTADOS FACILMENTE.
- TRABALHAM COM PRESSÕES DE ATÉ 50 atm.
- A MANUTENÇÃO É SIMPLES E ECONÔMICA (APENAS SUBSTITUIÇÃO PERIÓDICA DAS LONAS).

#### DESVANTAGENS:

- OPERAÇÃO INTERMITENTE. A FILTRAÇÃO DEVE SER INTERROMPIDA QUANDO OS QUADROS DE FILTAÇÃO FICAREM CHEIOS DE TORTA.
- O CUSTO DA MÃO DE OBRA DE OPERAÇÃO, MONTAGEM E DESMONTAGEM É ELEVADO.
- A LAVAGEM DA TORTA PODE DURAR VÁRIAS HORAS.

#### 12.4.3 FILTROS CONTÍNUOS ROTATIVOS:

PODEM SER DE TAMBOR, DISCO OU HORIZONTAIS.

SÃO INDICADOS PARA OPERAÇÕES QUE NECESSITAM DE FILTROS DE GRANDE CAPACIDADE. SÃO DE FUNCIONAMENTO CONTÍNUO.

A SAÍDA DE FILTRADO, A FORMAÇÃO DA TORTA, A LAVAGEM, A DRENAGEM E DESCARGA DA TORTA SÃO FEITAS AUTOMATICAMENTE.

EMBORA ALGUNS FUNCIONEM SUB PRESSÃO, GERALMENTE OPERAM A VÁCUO.

#### FILTRO DE TAMBOR ROTATIVO (Filtro Oliver):

CONSTA DE UM TAMBOR CILÍNDRICO HORIZONTAL DE 30 cm A 5m DE DIÂMETRO, POR 30 cm A 7 m DE COMPRIMENTO, QUE GIRA A BAIXA VELOCIDADE (0,1 A 2 rpm) PARCIALMENTE SUBMERSO NA SUSPENSÃO A FILTRAR.

A SUPERFÍCIE EXTERNA DO TAMBOR É FEITA DE TELA OU METAL PERFURADO SOBRE A QUAL É FIXADA A LONA FILTRANTE.

O CILINDRO É DIVIDIDO EM SETORES (8 A 24). À MEDIDA QUE O TAMBOR GIRA, OS DIVERSOS SETORES VÃO PASSANDO SUCESSIVAMENTE PELA

SUSPENSÃO. ENQUANTO UM DADO SETOR ESTIVER SUBMERSO, AUTOMÁTICAMENTE FICA COMUNICADO COM O RESERVATÓRIO DE FILTRADO E QUE É MANTIDO EM VÁCUO DE 200 A 500 mm Hg.

LOGO QUE ESSE SETOR SAIR DA SUSPENSÃO E A TORTA ESTIVER DRENADA COMEÇA A LAVAGEM. A ÁGUA DE LAVAGEM É RECOLHIDA NO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DE LAVAGEM. PODEM SER FEITAS QUANTAS LAVAGENS FOREM ACHADAS NECESSÁRIAS.

EM SEGUIDA A TORTA É SOPRADA COM AR COMPRIMIDO E RASPADA POR MEIO DE UMA FACA.

A RETIRADA DA TORTA NUNCA É TOTAL POR DOIS MOTIVOS:

- a) Para não haver risco de rasgar a lona ou a tela do filtro.
- b) Para não “quebrar” o vácuo.

Em geral 30 a 40% da área ficam submersos na suspensão que será filtrada.

IMPORTANTE:

Para aumentar a capacidade do filtro, a imersão pode ser aumentada para até 70%.

A espessura da torta formada é de 3 mm a 4 cm, podendo chegar a 10 cm em casos excepcionais de sólidos grosseiros.

A CAPACIDADE DESTES FILTROS É BASTANTE GRANDE, VARIANDO ENTRE 0,5 A 20 t/h POR METRO QUADRADO.

AS ÁREAS VARIAM DE 1 A 100 m<sup>2</sup>.

VANTAGENS DO FILTRO DE TAMBOR ROTATIVO

- a) Grande capacidade
- b) Pouca mão de obra necessária.

#### DESVANTAGENS DO FILTRO ROTATIVO

- a) Custo elevado
- b) Alto custo de operação
- c) Limitação da diferença de pressão ao máximo de 1 atm
- d) Imperfeição da lavagem

#### FILTRO DE DISCO-ROTATIVO

NESTE CASO O TAMBOR É SUBSTITUIDO POR DISCOS VERTICAIS QUE GIRAM PARCIALMENTE SUBMERSOS NA SUSPENSÃO.

NESTE CASO O TAMBOR É SUBSTITUIDO POR DISCOS VERTICAIS QUE GIRAM PARCIALMENTE SUBMERSOS NA SUSPENSÃO. O ELEMENTO FILTRANTE É NA REALIDADE CONSTITUIDO DE LÂMINAS, MAS O FILTRO NÃO DEIXA DE TER AS CARACTERÍSTICAS DE UM FILTRO CONTÍNUO ROTATIVO.

#### VANTAGENS DO FILTRO DE DISCO ROTATIVO

- a) Grande área filtrante por unidade de área de implantação
- b) As áreas são bem maiores do as do modelo convencional, variando de 10 a 400 m<sup>2</sup>.

#### DESVANTAGEM DO FILTRO DE DISCO ROTATIVO

A lavagem é ainda menos eficiente do que no caso dos filtros de tambor rotativo.



## FILTRO CONTÍNUO HORIZONTAL

É UMA CORREIA TRANSPORTADORA PERMEÁVEL, ATRAVÉS DA QUAL PASSA O FILTRADO SOB SUCCÇÃO QUE É CONSEGUIDA POR MEIO DE CAIXAS QUE TRABALHAM A VÁCUO, SOB A CORREIA.

### 12.5 TEORIA DA FILTRAÇÃO:

Seja a seguinte nomenclatura utilizada:

$v$  = velocidade média de filtração (m/s)

$D_s$  = diâmetro médio superficial das partículas do leito (m)

$L$  = espessura do leito (m)

$\Delta p$  = perda de carga através do leito (m) de coluna de líquido

$\mu$  = viscosidade do filtrado (poise)

$F_f$  = fator de correção devido ao atrito do fluido, em função da porosidade ( $\epsilon$ ) do leito e da esfericidade ( $\psi$ ) das partículas.

$F_{Re}$  = fator de correção do número de Reynolds em função da porosidade ( $\epsilon$ ) do leito e da esfericidade ( $\psi$ ) das partículas.

$f$  = fator de atrito =  $(16)/Re$  para regime laminar.

$k$  = permeabilidade do leito poroso

$g_c$  = fator de consistência de unidades = 9,81

### 12.5.1 FILTROS DE LEITOS GRANULARES SOLTOS:

ESTUDA-SE COMO ESCOAMENTO DE UM FLUIDO ATRAVÉS DE UM MEIO POROSO DE ESPESSURA FIXA.

OS DEMAIS TIPOS ENVOLVEM TORTAS DE ESPESSURA VARIÁVEL. O CÁLCULO É FEITO DIRETAMENTE PELA FÓRMULA DE DARCY, QUE CORRESPONDE À EQUAÇÃO DE POISEUILLE PARA ESCOAMENTO LAMINAR EM TUBOS:

$$\Delta p = [(32 \cdot \mu \cdot L \cdot v) / (g_c \cdot D_s^2)] \cdot (F_f) / (F_{Re}) \quad \text{ou}$$

$$v = [(g_c \cdot D_s^2) \cdot (F_{Re}) / (32 \cdot F_f)] \cdot (\Delta p) / (\mu \cdot L)$$

$$\text{Sendo } k = [(g_c \cdot D_s^2) \cdot (F_{Re}) / (32 \cdot F_f)]$$

$$v = k \cdot (\Delta p) / (\mu \cdot L)$$

IMPORTANTE:

A velocidade assim calculada vale para leito poroso limpo. À medida que vai entupindo sua capacidade começa a diminuir e poderá chegar a menos da metade do valor inicial.

A velocidade de lavagem é de cerca de 0,5 m/minuto.

Para cada leito há uma velocidade ascendente bem definida do líquido de lavagem que fluidiza o leito. Esta é a máxima velocidade de lavagem.

Também se pode calcular a capacidade do filtro com base na equação de Carman-Kozeny, apresentada no capítulo de Fluidização de Sólidos.

### 12.5.2 FILTROS CONVENCIONAIS:

Vejamos quais são os fatores que controlam a velocidade de filtração:

EMBORA SINUOSOS E IRREGULARES, OS CANAIS DA TORTA SÃO DE PEQUENO DIÂMETRO E POR ISSO O ESCOAMENTO DO FILTRADO PELO

SEU INTERIOR DEVERÁ SER LAMINAR, DEVENDO SER APLICÁVEL A EQUAÇÃO DE POISEUILLE:

$$\Delta p = (2.f.L.v^2.\rho_F)/(g_c.D) = [(32.\mu.L.v)/(g_c.D^2)]$$

NESTA EXPRESSÃO,  $f$  = FATOR DE FRICÇÃO =  $16/Re$  PARA REGIME LAMINAR,  $L$  = COMPRIMENTO DO DUTO DE SECÇÃO CIRCULAR COM DIÂMETRO  $D$ ,

$v$  = velocidade média do escoamento

$\rho_F$  = massa específica da do fluido

SENDO ( $V$ ) O VOLUME DE FILTRADO E ( $dV/d\theta$ ) A VAZÃO VOLUMÉTRICA DE FILTRADO, E ( $n$ ) O NÚMERO DE CANAIS DE DIÂMETRO ( $D$ ) POR UNIDADE DE ÁREA FILTRANTE ( $A$ ), PODE-SE ESCREVER:

$$v = (dV/d\theta)/(n.A.3,1416.D^2/4) \quad \text{Substituído na expressão do } \Delta p$$

e isolando valor de ( $dV/d\theta$ ) teremos:

$$(dV/d\theta) = [(3,1416 \times g_c)/128] \times \Delta p \times A \times (n.D^4)/(L) \times (1/\mu)$$

ESTA EXPRESSÃO NÃO SERVE PARA RELACIONAR DE MODO QUANTITATIVO, COM VISTAS AO PROJETO, A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO COM AS DEMAIS VARIÁVEIS.

NA VERDADE O MODELO FÍSICO NÃO CONDIZ COM A REALIDADE, POIS OS CANAIS, ALÉM DE NÃO SEREM CIRCULARES E NÃO APRESENTAREM SECÇÃO CONSTANTE, TODOS NÃO POSSUEM O MESMO COMPRIMENTO  $L$ .

ALÉM DISSO, O VALOR DE ( $n$ ) É DESCONHECIDO E NÃO PODE SER DETERMINADO.

APESAR DE TUDO ISSO, A EXPRESSÃO É ÚTIL POR EVIDENCIAR QUE, MESMO ABANDONANDO A MAIOR PARTE DAS SIMPLIFICAÇÕES FEITAS, A VELOCIDADE DE FILTRAÇÃO É:

- A) PROPORCIONAL À QUEDA DE PRESSÃO
- B) PROPORCIONAL À ÁREA DE FILTRAÇÃO (A)
- C) INVERSAMENTE PROPORCIONAL À VISCOSIDADE
- D) PROPORCIONAL A  $(n \cdot D^4)/(L)$  E, SENDO ASSIM, AUMENTA

COM O NÚMERO DE CANAIS DA TORTA, CRESCE RÁPIDAMENTE COM O DIÂMETRO DOS CANAIS E À MEDIDA QUE (L) DIMINUI.

COM BASE NESTAS CONCLUSÕES SEMIQUANTITATIVAS PODEREMOS DESENVOLVER AS EQUAÇÕES DE PROJETO.

HÁ MUITAS EM USO, MAS NENHUMA É INTEIRAMENTE SATISFATÓRIA, PORQUE TODAS UTILIZAM PROPRIEDADES DA TORTA QUE NÃO PODEM SER CALCULADAS A PARTIR DE OUTRAS PROPRIEDADES.

COMO TODO PROCESSO, NA FILTRAÇÃO

$$\text{VELOCIDADE} = (\text{DIFERENÇA DE POTENCIAL}) / (\text{RESISTÊNCIA})$$

NESSE CASO A DIFERENÇA DE POTENCIAL É A DIFERENÇA DE PRESSÃO (QUEDA DE PRESSÃO) E A RESISTÊNCIA É A RESISTÊNCIA DO MEIO FILTRANTE QUE SE SOMA À RESISTÊNCIA DA TORTA. QUE POR SUA VEZ AUMENTA COM O TEMPO PORQUE A ESPESSURA AUMENTA.

ALÉM DISSO É CLARO QUE AS DUAS RESISTÊNCIAS DEPENDEM DA VISCOSIDADE DO FILTRADO. ENTÃO:

$$dV/d\theta = (\Delta p) / \mu \cdot (R + R')$$

PARA TORTA HOMOGÊNEA INCOMPRESSÍVEL E RESISTÊNCIA DO FILTRO DESPREZÍVEL, TEMOS:  $R' = 0$

Como  $L \times A = v \times V$  com a seguinte nomenclatura:

A = área da torta

v = volume da torta por unidade de volume

V = volume de filtrado até t =  $\theta$

L = espessura da torta

$$(dV/d\theta) = (\Delta p)/[\mu.r.v.(V/A).(1/A)] \quad \text{onde } (r) \text{ é uma constante}$$

$$d(V/A)/d\theta = (\Delta p)/[\mu.r.v.(V/A)]$$

ESTA EQUAÇÃO PARA ESSE CASO PODE SER INTEGRADA [a variável é (V/A)] TANTO PARA OPERAÇÃO REALIZADA A PRESSÃO CONSTANTE COMO A VAZÃO CONSTANTE.

Para vazão constante a equação já está integrada:

$$(V/A)/\theta = (\Delta p)/[\mu.r.v.(V/A)]$$

Para pressão constante:

$$(V/A)/\theta = (\Delta p)/[(\mu.r.v/2) . (V/A)]$$

### IMPORTANTE:

A filtração contínua não deve ser tentada quando a espessura da torta de 1/8" não puder ser formada em menos de 5 minutos.

Os processos de filtração são classificados pela taxa de formação de torta num filtro à vácuo de laboratório (VACUUM-LEAF FILTER) EM:

RÁPIDO	0,1 a 10 cm/s
MÉDIO	0,1 a 10 cm/min
LENTO	0,1 a 10 cm/h