

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
LOQ4085 – OPERAÇÕES UNITÁRIAS I – MAIO 2019
PROFESSORA: LÍVIA CHAGURI E CARVALHO

SEPARAÇÕES MECÂNICAS

FILTRAÇÃO

1. Introdução

Filtração é a remoção de partículas sólidas de um fluido pela passagem deste fluido através de um meio filtrante, no qual os sólidos são depositados. O que diferencia a filtração dos outros processos de separação sólido-fluido é que na filtração, o fluido (geralmente na fase líquida) se move através do sólido estacionário. O movimento da fase fluida através do meio filtrante se dá devido a um diferencial de pressão através do meio.

Numa primeira análise diz-se que a filtração pode ou não ocorrer com a formação de uma subcamada de material filtrante (torta) que é um elemento fundamental no estudo da maioria dos processos de filtração.

Um exemplo simples da formação da chamada torta seria imaginando um escoamento vertical de uma suspensão sólido-líquido dentro de uma coluna em duas situações distintas:

1. A suspensão passa por um meio filtrante que está disposto como um recheio dentro da coluna (Figura 1). Neste caso as partículas sólidas da suspensão são retidas no recheio da coluna, de forma que essencialmente só o líquido (filtrado) sai da coluna.

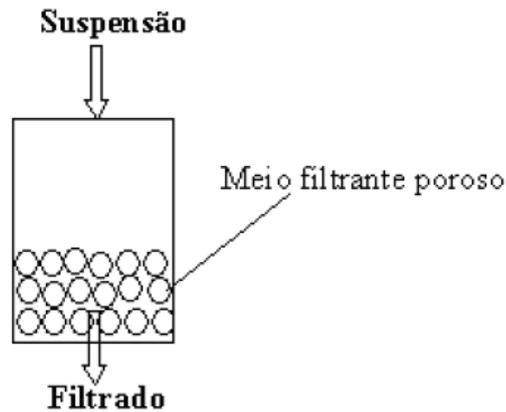


Figura 1. Filtração sem formação de torta.

2. A mesma suspensão passa por outro tipo de filtro que possui uma superfície filtrante, chamada de meio filtrante (Figura 2). Neste caso as partículas do sólido ficam retidas na superfície filtrante, de modo que essencialmente só o líquido (filtrado) chega ao fundo da coluna. Conforme o andamento do processo, ocorre um acúmulo de massa de sólidos acima da superfície filtrante formando uma subcamada. Esta subcamada ou torta cresce com o passar do tempo e auxilia durante boa parte do tempo a própria eficiência da filtração, tornando-se um novo meio filtrante, ou seja, uma espécie de manta porosa filtrante.

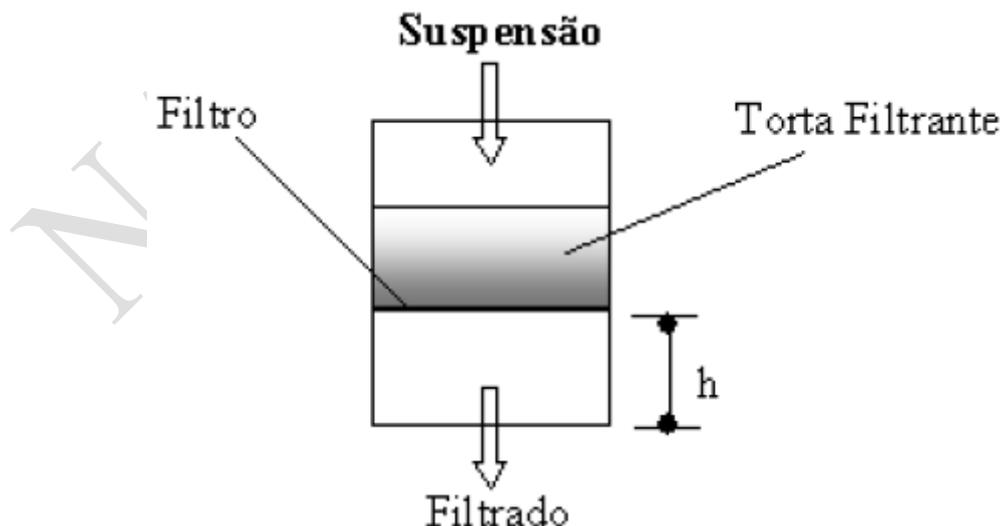


Figura 2. Filtração com formação de torta.

Com essas informações pode-se atribuir uma definição simplificada da filtração. Desta forma, para que haja filtração ao menos duas condições devem ser atendidas:

1. a porosidade do meio deve ser maior que o “tamanho” das partículas a serem filtradas;
2. existe a formação “na maioria dos casos práticos da indústria” de uma torta filtrante.

A filtração “clássica” depende basicamente dos seguintes fatores:

Queda de pressão, ou seja, a diferença entre a pressão no início da filtração (início da formação da torta ou do meio poroso dependendo) e a pressão na saída do meio filtrante;

Área do meio filtrante, considerando a área do meio filtrante a soma da área do filtro, mais a área da torta formada (no caso de filtração com formação de torta) e a área do meio poroso para a filtração;

Viscosidade do filtrado, para suspensões considera-se a influência da temperatura e por vezes da pressão;

Resistência do filtro e das camadas iniciais de torta, dado que para que ocorra a filtração é necessário que a força motriz supere essas resistências;

Resistência da torta propriamente dita, uma vez que quase sempre há um limite na espessura da torta formada.

2. Mecanismos de filtração

Basicamente são 3 os mecanismos de filtração: a filtração convencional com o emprego de coadjuvantes de filtração para formação da torta, a clarificação e a filtração cruzada.

A filtração cruzada é mais utilizada para separação de partículas coloidais ou grandes moléculas, por meio de uma membrana com aberturas muito pequenas. A operação é conhecida conforme o tamanho da abertura da membrana, podendo ser microfiltração, ultrafiltração ou nanofiltração.

O mecanismo convencional é o mais utilizado. Durante o processo de filtração ocorre a formação da torta, portanto o fluido atravessa duas resistências em série: a da própria torta e a do meio filtrante. Assim, a diferença de pressão desse sistema a qualquer tempo pode ser expressa como a soma das perdas de carga:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = (P_1 - P') + (P' - P_2) = \Delta P_t + \Delta P_m \quad (1)$$

Em que:

ΔP – perda de carga total (Pa);

P_1 e P_2 – pressões na entrada e saída (Pa);

P' – pressão no limite entre a torta e o meio filtrante (Pa);

P_t – perda de carga relativa a torta (Pa)

P_m – perda de carga relativa ao meio filtrante (Pa).

A filtração pode ocorrer a pressão constante ou com pressão variável.

A pressão constante, a perda de carga é mantida constante e o fluxo de filtrado diminui com o tempo de operação.

A pressão variável, a perda de carga aumenta progressivamente, o fluxo de filtrado é constante e portanto, a operação é conhecida como filtração a vazão constante.

3. Perda de carga

Perda de carga relativa à torta formada ($-\Delta P_t$)

O comportamento da torta formada na filtração pode ser estudado pela Equação de Carman – Koseny para escoamento leito porosos:

$$\frac{(-\Delta P_t)}{e_t} = \frac{K'' \mu a_s^2 v (1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (2)$$

Em que:

ΔP_t – queda de pressão na torta (Pa);

e_t – espessura da torta (m);

a_s – área superficial específica da partícula unidade de volume (m^2/m^3);

μ – viscosidade do filtrado (Pa.s);

ε – porosidade da torta formada (adimensional);

K'' – constante de Koseny (adimensional);

v – velocidade de escoamento (m/s).

Lembrando que a equação (2) é válida para partículas que não tem seu tamanho e forma modificados e que se depositam de forma aleatória durante a formação da torta. Sendo a velocidade de escoamento (v) expressa por:

$$v = \left[\frac{1}{A} \frac{dV}{dt} \right] \quad (3)$$

Em que:

A – área normal ao fluxo de filtrado (m^2);

V – volume de filtrado coletado no início até o tempo t (m^3);

dV/dt – razão volumétrica de filtração (m^3/s).

O balanço de massa na torta em formação (Figura 3) em que a massa dos sólidos na suspensão = massa sólidos do filtrado e do meio poroso é dado por:

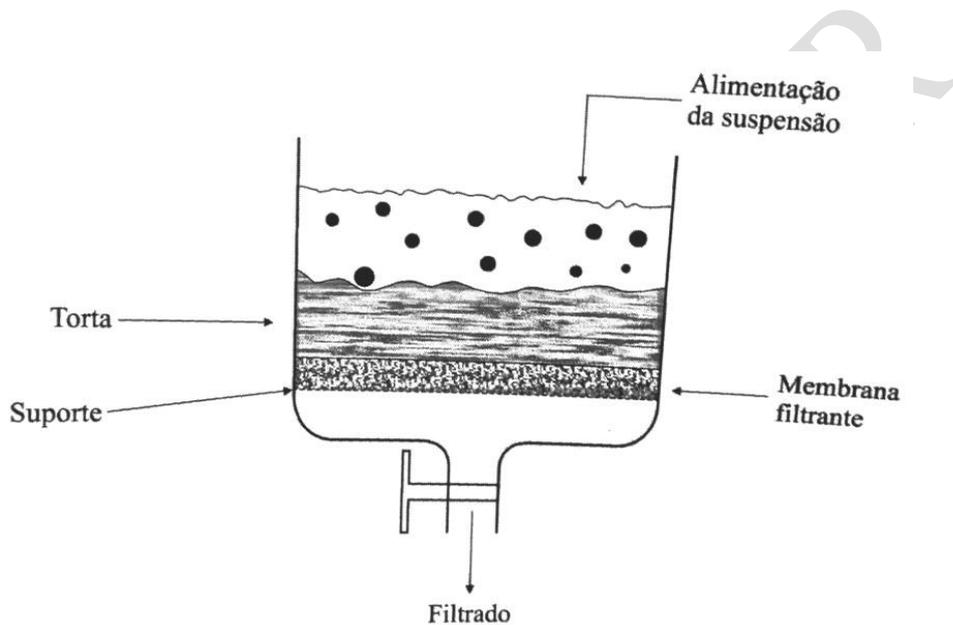


Figura 3. Esquema de formação de torta durante a filtração.

$$e_t A(1-\varepsilon)\rho_p = c_t(V + \varepsilon e_t A) \quad (4)$$

ρ_p – densidade da partícula (kg/m^3);

c_t – massa de sólido seco na torta por unidade de volume de filtrado (kg/m^3).

Os valores de c_t (massa de sólido seco na torta), de V (volume de filtrado) e de m_s (massa de torta seca) (kg) são relacionados a partir do balanço de massa na torta formada, resultando nas seguintes equações:

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

$$c_t = \frac{\rho \left(\frac{m_s}{m_L} \right)}{\left(1 - \left(\frac{m_u}{m_s} \frac{m_s}{m_L} \right) \right)} \quad (5)$$

$$V = \frac{m_s}{c_t} \quad (6)$$

Em que:

m_s – massa da torta seca (kg/kg); m_L é a massa da suspensão (kg/kg), m_u é a massa da torta úmida (kg/kg) e ρ é a densidade da suspensão (kg/m³).

Na equação (4), o volume retido na torta ($\varepsilon e_t A$) é pequeno se comparado ao volume do filtrado, portanto, esse termo pode ser desprezado. Isolando a espessura da torta tem-se:

$$e_t = \frac{c_t V}{A(1-\varepsilon)\rho_p} \quad (7)$$

Substituindo (7) e (3) em (2) tem-se:

$$(-\Delta P_t) = \frac{\alpha \mu c_t V}{A^2} \frac{dV}{dt} \quad (8)$$

Em que: α é a resistência específica da torta (m/kg), resultado do agrupamento das seguintes propriedades:

$$\alpha = \frac{K'' a_s^2 (1-\varepsilon)}{\rho_p \varepsilon^3} \quad (9)$$

Perda de carga relativa ao meio filtrante (- ΔP_m)

A perda de carga no meio filtrante é expressa de modo análogo ao da torta:

$$(-\Delta P_m) = \frac{R_m \mu}{A} \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

Em que: R_m – resistência do meio filtrante (1/m)

4. Tipos de torta

As características da torta produzida variam de uma operação para outra. Sólidos cristalinos formam tortas abertas que facilitam o escoamento do filtrado. Já os precipitados gelatinosos, como os hidróxidos de ferro e alumínio, produzem tortas pouco permeáveis. De um modo geral o tipo de torta depende:

- da natureza do sólido,
- da granulometria e da forma das partículas,
- do modo como a filtração é conduzida,
- do grau de heterogeneidade do sólido.

Uma torta com uma dada espessura oferece uma resistência bem definida ao escoamento do filtrado. Quando a vazão de filtrado aumenta, também a resistência aumenta e, como o escoamento no interior da torta é laminar, a queda de pressão deve ser, em princípio, proporcional à velocidade. Se a vazão dobrar, a queda de pressão ficará duas vezes maior. Algumas tortas cristalinas comportam-se dessa forma. Outras, porém, acarretam quedas de pressão que aumentam mais rapidamente com a vazão e, assim sendo, quando se duplica a vazão, a queda de pressão resulta mais do que o dobro. É evidente, neste segundo caso, que a resistência da torta ao escoamento do filtrado aumenta com a pressão. Tortas deste tipo denominam-se compressíveis, em contraste com as outras, que são incompressíveis.

Uma torta compressível comporta-se como uma esponja. Pressionada, a esponja oferece maior resistência ao escoamento de líquidos pelo seu interior porque os canais fecham-se e alguns até deixam de existir. É evidente, portanto, que a filtração de uma suspensão que produz torta compressível é mais difícil do que se a torta for incompressível. Como foi dito anteriormente, uma das funções do auxiliar de filtração é diminuir a compressibilidade da torta, sendo que ele desempenha o papel de “esqueleto” da torta. Portanto, a torta é compressível quando a resistência específica, ou permeabilidade, é função da diferença de pressão através da mesma.

Resumidamente:

Torta incompressível:

- Resistência ao escoamento do filtrado não muda, à medida que aumenta a e_t ;
- Resistência ao escoamento do filtrado é independente da pressão;
- Área específica da partícula e a porosidade da torta não sofrem influência da compressão que é exercida na camada

Torta compressível:

- Resistência ao fluxo (α) é dependente da queda de pressão:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta P)^n \quad (11)$$

α_0 – (m/kg Pa⁻ⁿ) e n (adimensional – são constantes empíricas); n é sempre conhecida como coeficiente de compressibilidade da torta (é zero para tortas incompressíveis) e geralmente entre o valor de n varia entre 0,2 e 0,8 para tortas compressíveis.

5. Filtração a pressão constante

A queda de pressão total no filtro é a soma das quedas de pressões, portanto, considerando as equações (1) (8) e (10) tem-se:

$$(-\Delta P) = (-\Delta P_t) + (-\Delta P_m) = \mu v \left(\frac{\alpha V c_t}{A} + R_m \right) \quad (12)$$

A equação (12) poder ser escrita como (considerando a equação 3):

$$(-\Delta P) = \mu \frac{dV}{dt} \frac{1}{A} \left(\frac{\alpha V c_t}{A} + R_m \right) \quad (13)$$

A equação (13) é conhecida como a equação fundamental da filtração:

Reescrevendo a equação (13) para qualquer tempo tem-se:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{\dot{Q}} = K_{\Delta P} V + \frac{1}{\dot{Q}} \quad (14)$$

Em que: \dot{Q} = vazão volumétrica em qualquer tempo; $K_{\Delta P}$ = constante (s/m⁶).

Integrando a equação (14):

$$\frac{t}{V} = \frac{K_{\Delta P} V}{2} + \frac{1}{\dot{Q}_0}$$

(15)

Fazendo a regressão linear dos dados experimentais t/V em função de V , os valores de $K_{\Delta P}$ e de $1/Q_0$ podem ser obtidos pela equação da reta expressa na equação (15). Essas constantes também podem ser obtidas pelas equações:

$$K_{\Delta P} = \frac{\alpha \mu c_t}{A^2(-\Delta P)} \quad (16)$$

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{R_m \mu}{A(-\Delta P)} \quad (17)$$

Exemplo 1. Em um experimento, um filtro tipo prensa de laboratório, cuja área de filtração é $0,055 \text{ m}^2$, é operado sob condições de queda de pressão constante de 210 kPa. O volume de filtrado foi coletado, em tempos regulares e os dados estão apresentados na Tabela abaixo. Calcular os valores de $K_{\Delta P}$ e de $1/Q_0$.

Tempo (s)	Volume (L)
14	1,15
18	1,35
22	1,55
26	1,75
31	1,95
36	2,15
42	2,35
48	2,55
54	2,75
61	2,95
68	3,15
75	3,35

6. Filtração com vazão volumétrica constante

A filtração em condições de vazão volumétrica constante é uma operação realizada com menor frequência, pois a queda de pressão aumenta com o tempo dado que a vazão da alimentação é mantida constante. Neste caso a velocidade de escoamento é constante:

$$v = \frac{dV}{dt} \frac{1}{A} = \frac{V}{At} \quad (18)$$

Da equação (8), que define a $(-\Delta P_t)$ é possível relacionar $(-\Delta P_t)$ com a resistência específica da torta (α), considerando v constante. Ainda assim, pode-se chegar a uma expressão de perda de carga total para um filtro operando em vazão constante, que de forma linearizada chega-se a:

$$(-\Delta P) = K_{\Delta V} V + (-\Delta P_0) \quad (19)$$

Em que: $K_{\Delta V}$ – constante (Pa/m^3); ΔP_0 – perda de carga inicial (Pa)

Portanto, a partir da regressão linear aplicada nos dados experimentais de $(-\Delta P)$ em função de V , os valores de $K_{\Delta V}$ e $(-\Delta P_0)$ podem ser expressos por:

$$K_{\Delta V} = \frac{\alpha \mu c_t \dot{Q}}{A^2} \quad (20)$$

$$(-\Delta P_0) = \frac{R_m \mu \dot{Q}}{A} \quad (21)$$

Filtro prensa:

Este tipo de equipamento pode operar em condição de pressão ou vazão volumétrica constante.

Os filtros prensa são projetados para realizar diversas funções, cuja seqüência é feita manualmente.

Durante a filtração, o filtro-prensa:

- permite a injeção da suspensão a filtrar até as superfícies filtrantes, por intermédio de canais apropriados;

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

- permite a passagem forçada da suspensão através das superfícies filtrantes;
- permite que o filtrado que passou pelas superfícies filtrantes seja expelido através de canais apropriados; e
- retém os sólidos que estavam inicialmente na suspensão.

Durante a seqüência de lavagem, o filtro-prensa:

- encaminha a água de lavagem para os sólidos filtrados, através de canais apropriados;
- força a água de lavagem através dos sólidos retidos no filtro; e
- permite a expulsão da água de lavagem, e das impurezas, através de um canal separado.

Depois da sequência de lavagem, o filtro-prensa é desmontado e os sólidos ou são coletados manualmente, ou simplesmente removidos e descartados.

A Figura 3 apresenta um esquema de filtro prensa (placas e quadros) com seus componentes.

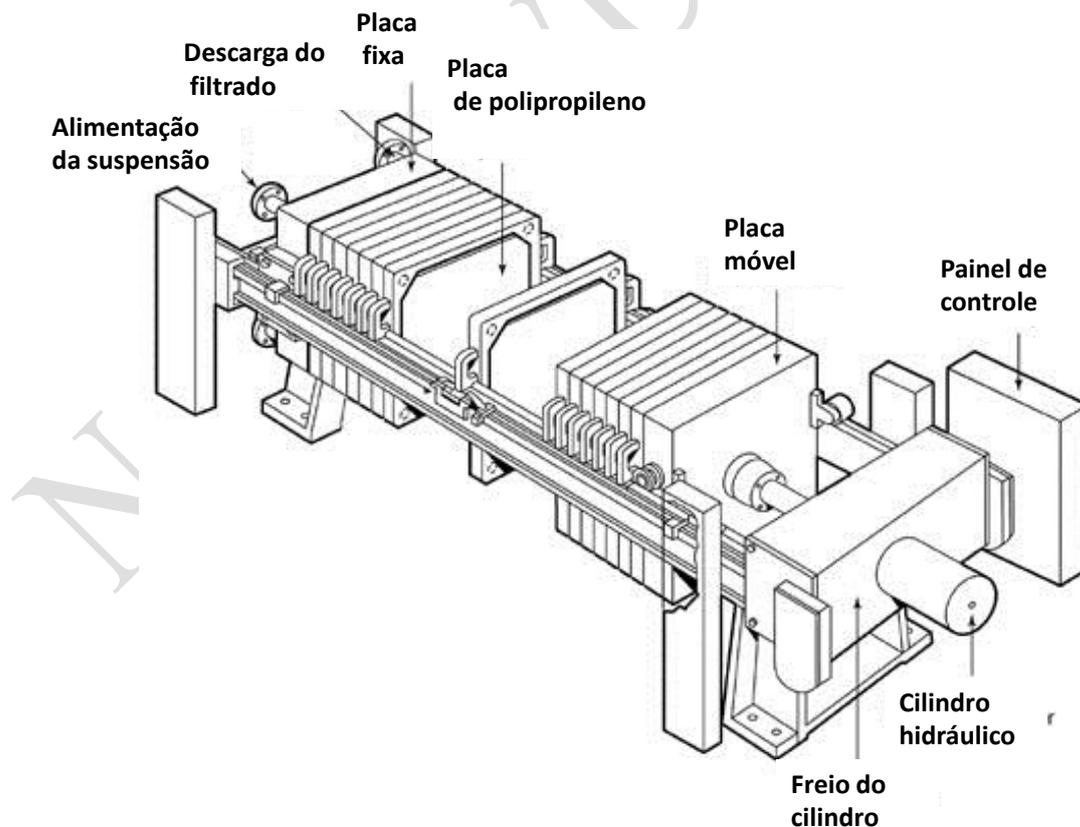


Figura 3. Filtro prensa de placas e quadros.

Filtros prensa de placas e quadros:

Neste tipo de equipamento as placas são quadradas, com faces planas e bordas levemente ressaltadas. Entre duas placas sucessivas há um quadro que serve como espaçador das placas. De cada lado do quadro há um tecido que encosta-se à placa correspondente. Assim, as câmaras onde será formada a torta ficam delimitadas pelo tecido.

Dimensões:

- placas: variam de 15 cm a 1,50 m de lado, com 0,5 – 5 cm de espessura

- quadros: espessuras que variam de 0,5 – 20 cm

Alguns equipamentos têm dispositivos de aquecimento com vapor, para reduzir a viscosidade e aumentar a taxa de filtração (materiais, como as ceras, que solidificam a temperatura ambiente podem ser filtrados em filtros prensa aquecidos a vapor).

Tempo de ciclo de operação (TCO) – a espessura ótima da torta que será formada em um filtro prensa depende da resistência oferecida pela torta e do tempo que leva para montar e desmontar a prensa:

TCO = tempo (montar + desmontar) + tempo filtração

A Figura 4 apresenta uma placa e um quadro. A placa é identificada por 1 botão na face externa e o quadro, por 2 botões.

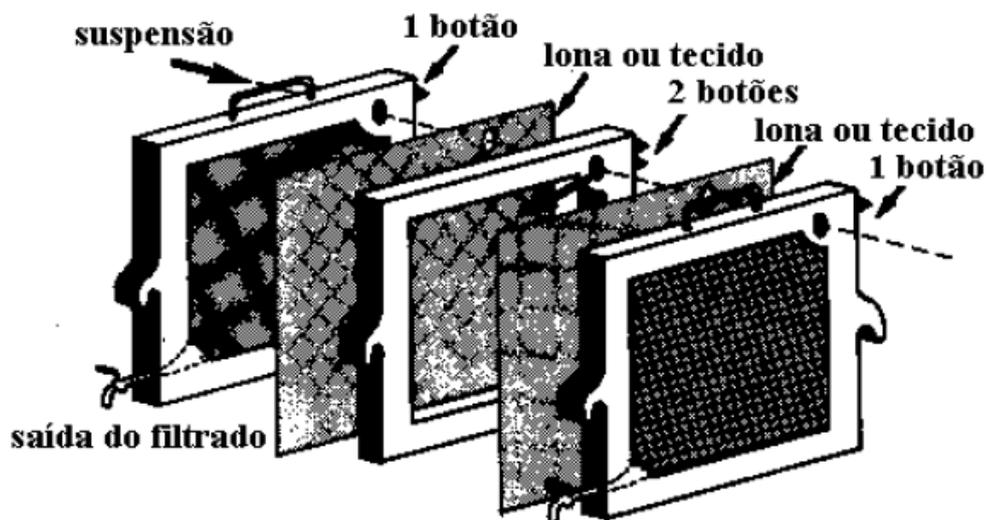


Figura 4. Placas e quadros de um filtro prensa.

Para obter a máxima produção de filtrado, o tempo de filtração deve ser um tanto maior que o tempo de montagem e desmontagem do filtro. Quanto menor a resistência da torta, maior será a espessura da torta que dará o tempo de ciclo ótimo.

Para a lavagem do filtro pode-se utilizar dois métodos diferentes:

- ✓ **Simple:** o líquido de lavagem é introduzido no mesmo sentido de escoamento da filtração; existe a possibilidade de formação de canais preferenciais e a lavagem obtida é irregular (usa-se quando a torta não enche toda a moldura ou quadro).
- ✓ **Completa:** o líquido é introduzido através de um canal por trás do tecido de filtração em placas alternadas, e corre através de toda a espessura da torta, primeiro na direção oposta e depois na mesma direção do filtrado. Placas de lavagem são utilizadas na montagem do filtro.

Vantagens do Filtro Prensa:

- ✓ Devido sua simplicidade de construção e versatilidade pode ser usado para uma larga faixa de materiais sob variadas condições de operação com a espessura da torta e pressão.
- ✓ Não tem partes móveis, tendo baixo custo de manutenção e de energia.
- ✓ Possuem grande área de filtração por área de implantação (espaço no chão)
- ✓ Maioria das juntas é externa e os vazamentos são facilmente detectados.
- ✓ Alta pressão (até 50 kg/cm²) de operação é usualmente possível.
- ✓ Flexibilidade (pode-se aumentar ou diminuir a área de filtração)

Desvantagens do Filtro Prensa:

- ✓ **Operação intermitente:** a montagem e a desmontagem podem estragar o meio filtrante (tecido).
- ✓ Mesmo com automatização da montagem e desmontagem o custo de mão de obra é elevado.
- ✓ **Problemas com lavagem da torta dependendo da torta:** tempo longo para partículas finas (maior tempo de lavagem para tortas mais densas). Suspensões de granulometria uniforme dão tortas mais homogêneas e mais fáceis de lavar. O uso de auxiliares de filtração auxilia na lavagem, mas não resolvem o problema.

7. Filtração contínua

Um dos equipamentos mais utilizados neste tipo de operação é o filtro rotativo á vácuo, em que a alimentação, filtrado e a torta, se movem a taxas constantes. No entanto, para qualquer elemento da superfície do filtro as condições não são estacionárias e sim transientes.

Este processo ocorre em várias etapas, sendo:

- formação da torta;
- lavagem do filtro;
- secagem da torta;
- descarga da torta.

A perda de carga através do filtro durante a formação da torta é mantida constante.

Da raiz positiva para o volume, da solução da equação (14) obtém-se a expressão que relaciona V em função de t:

$$V = \left[\left(\frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} \right)^2 + 2 \frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} t \right]^{0,5} - \frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} \quad (22)$$

Essa equação pode ser aplicada para uma filtração contínua, como filtro de tambor rotativo a vácuo, em que o tempo de filtração (t) é uma fração do tempo do ciclo (t_{cf}) e f'_v é a fração de volume que se encontra imerso na suspensão:

$$t = f'_v t_{cf} \quad (23)$$

Substituindo (22) e (23) na equação que define a espessura da torta a pressão constante (equação 7), tem-se:

$$e_t = \frac{c_t}{A(1-\varepsilon)\rho_p} \left[\left[\left(\frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} \right)^2 + 2 \frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} f'_v t_{cf} \right]^{0,5} - \frac{1}{K_{\Delta P} \dot{Q}_0} \right] \quad (24)$$

Filtro rotativo:

Os filtros contínuos são indicados para operações que requerem filtros de grande capacidade, e podem ser aplicados quando:

- torta forma-se rapidamente (vazão de suspensão > 5 l/min)

Este é um material que complementa as aulas, o estudo da disciplina deve ser feito com base na bibliografia da disciplina que está no sistema Jupiter. A publicação deste material não está autorizada.

- concentração da suspensão > 1%
- partículas > 100 μ m.
- viscosidade líquido < 100 cp para rápido fluxo através torta.

Alguns filtros contínuos podem não seguir as especificações acima, entretanto para compensar necessitam de agentes de filtração.

Filtro de tambor rotativo (Filtro Oliver):

É o mais utilizado tipo de filtro contínuo, existindo vários modelos com pressão e com vácuo, sendo a maior variação na forma de descarga dos sólidos.

É um tambor cilíndrico horizontal (30 cm a 5 m de diâmetro, por 30 cm a 7 m de comprimento) que gira em baixa velocidade (0,1 a 2 rpm) parcialmente submerso na suspensão a filtrar. Detalhes podem ser vistos na Figura 5.

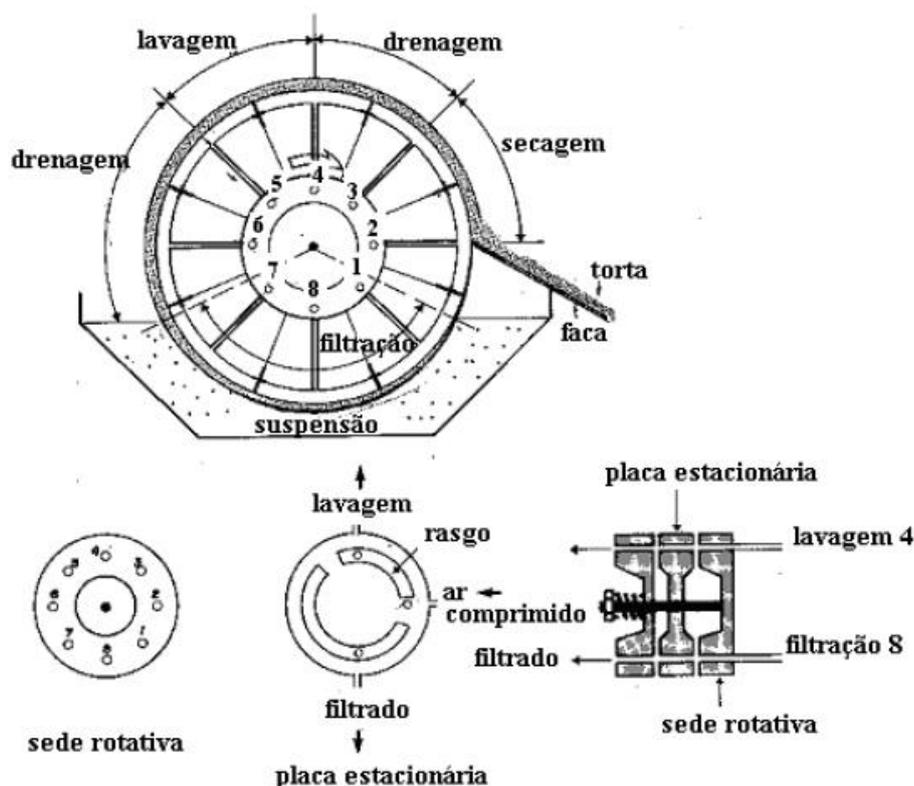


Figura 5. Filtro de tambor rotativo.

A alimentação é feita com 30 a 40% da circunferência do tambor imerso na suspensão.

Para obter maior capacidade a imersão pode ser aumentada até 70%.

A espessura da torta formada é de 3 mm a 4 cm, podendo chegar até 10 cm para sólidos grosseiros.

Alguns modelos promovem suspensão de sólidos para filtração por meio de raspadores ou agitadores, para impedir a sedimentação da suspensão.

Sólidos difíceis de manter suspensão, ou que decantam com facilidade (cristais e sólidos pesados), podem ser alimentados no topo.

Os filtros de tambor rotativo são classificados de acordo com a alimentação e a descarga de sólidos.

Filtro de disco rotativo:

Representado pela Figuras 6, o tambor é substituído por discos verticais que giram parcialmente submersos na suspensão. O elemento filtrante é constituído de lâminas, mas o filtro não deixa de ter as características de um filtro contínuo rotativo.

A mesa horizontal é constituída por um conjunto de segmentos, na forma de setores circulares, cada qual com o topo metálico perfurado ou feito em tela metálica. Cada setor é recoberto por um meio filtrante conveniente, e está ligado a um mecanismo central de válvulas, que regulam os instantes apropriados de remoção do filtrado e dos líquidos de lavagem e do enxugamento da torta, durante cada volta da mesa. A superfície filtrante horizontal impede que os sólidos caiam ou sejam arrastados pela água de lavagem, e possibilita a operação com camadas muito pesadas de sólidos.

O filtro consiste em diversos discos, que podem chegar a 15 nas máquinas maiores, cada um composto de setores que são juntados para dar forma ao disco. Uma das principais características é que o espaço requerido pelos filtros de disco é mínimo e o custo por m² de área de filtração é o mais baixo, quando comparado a outros filtros de vácuo.

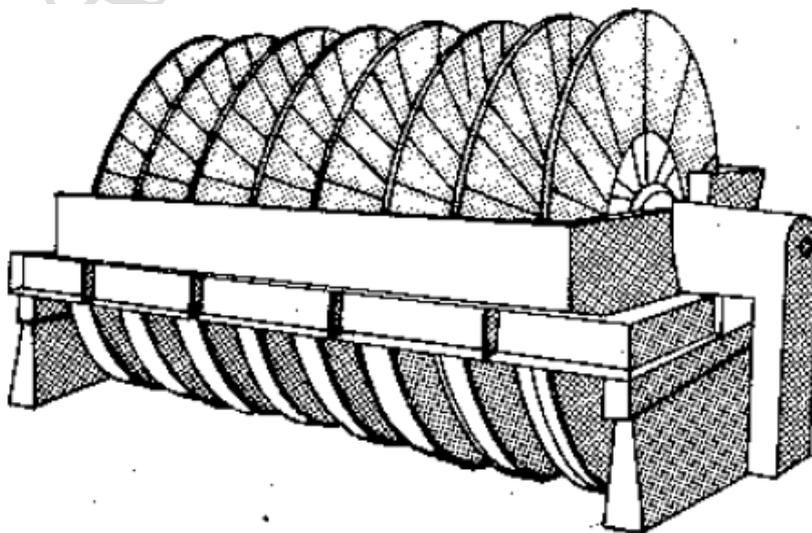


Figura 6. Filtro de disco rotativo.

O filtro contínuo rotativo é empregado na clarificação do caldo de cana e na produção de amido para remover uma parte da umidade.

Considerando a equação (22) para esse tipo de filtro e, se a resistência específica do meio filtrante for considerada desprezível a equação (22a) resultará em:

$$V = \left(2 \frac{t}{K_{\Delta P}} \right)^{0,5} = \left(2 \frac{f'_A \cdot t c_f}{K_{\Delta P}} \right) \quad (22a)$$

8. Lavagem da torta

A lavagem da torta é realizada para retirar o líquido que ainda está nos poros da torta. Geralmente, esse procedimento é feito com água, sendo sua vazão volumétrica igual à vazão no final do processo de filtração de queda de pressão constante.

A partir da equação fundamental da filtração (equação 13) a vazão volumétrica da lavagem pode ser determinada por:

$$\dot{Q}_L = \frac{V}{t} = \dot{Q}_F = \frac{A_L^2 (-\Delta P)}{\mu [\alpha \cdot c_t \cdot V + A_L \cdot R_m]} \quad (25)$$

Em que A_L = área de lavagem (m^2), \dot{Q}_L é a vazão de filtração (m^3/s), \dot{Q}_F a vazão de filtração (m^3/s).

Para filtro prensa, a área de lavagem (A_L) corresponde à metade da área de filtração, portanto, o líquido de lavagem passa duas vezes pelo filtro. Ainda assim, a resistência da água de lavagem (R_L) corresponde ao dobro da resistência do meio filtrante (R_m).

Portanto, a vazão de lavagem para um filtro prensa operando com queda de pressão constante pode ser definida por:

$$\dot{Q}_L = \frac{1}{4 \left[K_{\Delta P} \cdot V + \frac{\mu \cdot R_m}{2A(-\Delta P)} \right]} = \frac{1}{4 \left[K_{\Delta P} \cdot V + 2 \frac{1}{\dot{Q}_0} \right]} \quad (26)$$

Para t_L (tempo de lavagem):

$$t_L = \frac{V_L}{\dot{Q}_L} = 4V_L \left(K_{\Delta P} \cdot V + \frac{1}{2\dot{Q}_0} \right) \quad (27)$$

Sendo V_L o volume de líquido para lavar a torta (m^3).

Exercícios

Durante a filtração de uma suspensão, dados experimentais mostrados na Tabela abaixo foram obtidos. Sabe-se que a suspensão tem as seguintes características: relação mássica da torta úmida e seca igual a 1,6; fração mássica de sólidos na suspensão de 0,12 e a densidade do filtrado de 999 kg/m^3 . Calcular o volume do filtrado após 2 min de filtração

Tempo (s)	Massa de torta seca (kg)
4	0,12
9	0,25
15	0,37
22	0,49
28	0,61
35	0,74
41	0,86
50	0,98
61	1,10
66	1,23

Considere o exemplo anterior em que a formação da torta é homogênea, com porosidade constante igual a 0,35, a densidade da partícula que forma a torta igual a 1500 kg/m^3 e a área normal ao fluxo de filtrado de $0,9 \text{ m}^2$. Calcular a espessura da torta após 22 segundos de filtração.

3. No exercício 1. Considerar que a mesma suspensão será filtrada em um filtro tipo prensa com o meio filtrante com as mesmas características. O filtro é constituído de 18 quadros, cada um com área de $0,9 \text{ m}^2$ e as propriedades da torta e do filtrado não se alteram. Calcular:

O tempo necessário para obter $4,5 \text{ m}^3$ de filtrado;

O tempo de lavagem da torta em relação ao volume de água utilizado de $0,25 \text{ m}^3$, considerando o volume final de filtrado de 5 m^3 .

4. Em um experimento de filtração com queda de pressão constante (240 kPa), realizado em um filtro de lâminas, a seguinte equação foi obtida (em unidades do SI):

$$\frac{t}{V} = 1,8 \cdot 10^6 \cdot V + 3400$$

Se o sistema operar em regime de vazão volumétrica constante de $5,5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$, calcular o tempo necessário para que o sistema atinja a queda de pressão de 320 kPa .

Um filtro de tambor rotativo a vácuo (48 kPa), com área total de filtração de $7,8 \text{ m}^2$ e 22% de área submersa, completa um ciclo em 6 min . A concentração de sólidos na suspensão é de 25% , e a massa da torta seca formada em relação ao volume de filtrado é de 290 kg/m^3 , com resistência específica de $7,1 \times 10^{11} \text{ m/kg}$. Calcular a vazão mássica da suspensão que pode ser filtrada, considerando desprezível a resistência específica do meio filtrante.

6. Dados de uma filtração em laboratório de uma suspensão de CaCO_3 em água a $298,2 \text{ K}$ (25°C) $\mu = 8,937 \times 10^{-4} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (água a $298,2 \text{ K}$) realizada a uma pressão constante ($-\Delta P$) de 338 kN/m^2 , foram:

Área do filtro prensa de placa-quadro: $A = 0,0439 \text{ m}^2$

Concentração de alimentação: $c_t = 23,47 \text{ kg/m}^3$

Tempo (s)	Volume (m^3)
4,4	$0,498 \times 10^{-3}$
9,5	$1,000 \times 10^{-3}$
16,3	$1,501 \times 10^{-3}$
24,6	$2,000 \times 10^{-3}$
34,7	$2,498 \times 10^{-3}$
46,1	$3,002 \times 10^{-3}$
59,0	$3,506 \times 10^{-3}$
73,6	$4,004 \times 10^{-3}$
89,4	$4,502 \times 10^{-3}$
107,3	$5,009 \times 10^{-3}$

Calcule as constantes α e R_m a partir dos dados experimentais de volume de filtrado (m^3) versus tempo de filtração (s).

Estime o tempo necessário para filtrar 1 m^3 da mesma suspensão em um filtro industrial com 1 m^2 de área.

Se o tempo limite para essa filtração fosse de 1h, qual deveria ser a área do filtro?

Bibliografia:

- 1) CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos. Blucher, 423p. 2012;
- 2) FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. 2ed. Princípios das operações unitárias. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008;
- 3) GEANKOPLIS, C. J. Transport Processes and Separation Process Principles. 4ed. New York: Prentice Hall, 1026p. 2010;
- 4) MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. Unit operations of chemical engineering. 7ed. Boston: McGraw-Hill, 1140 p. 2005;
- 5) PERRY's chemical engineers handbook. Editor in Chief Don W. Green; Late Editor Robert H. Perry New York: McGraw-Hill, 2008.
- 6) TADINI, C. Telis, V.R.; Meirelles, A.J.A.; Pessoa, P.A. Operações Unitárias na indústria de alimentos. v1 1. ed. – Rio de Janeiro : LTC, 2016.

NAO DIVULGAR