

Aula 12: Separação Sólido-Fluido

Parte I: Introdução e filtração



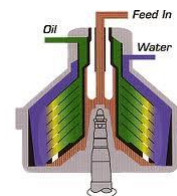
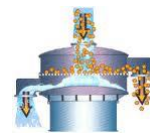
Prof. Dr. Wanderley P. de Oliveira

Lagoa Azul - Jericoacoara

↳ Operações de Separação Sólido - Fluido.

↳ Processos de Separação:

- Osmose reversa
- **Filtração**
- **Sedimentação**
- Flotação (sedimentação invertida)
- **Centrifugação**



A) Filtração

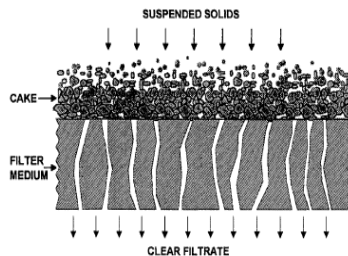
↳ É uma operação de separação de um sólido e de um fluido (pode ser gás ou líquido), que consiste na passagem da mistura sólido+fluido através de um meio poroso que retém o sólido, permitindo a passagem do fluido.

Nessa aula: **Ênfase** em Filtração de líquidos.

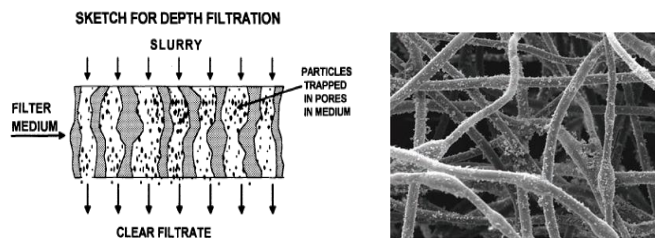
Aplicação farmacêutica da filtração gasosa

↳ esterilização do ar

↳ câmaras limpas



Filtração de superfície



Filtração por profundidade

↳ Definições Básicas

- **meio filtrante:** meio poroso usado para reter os sólidos;
- **lama:** mistura sólido+fluido a ser filtrada;
- **torta de filtração:** camada de sólidos que se acumula sob a superfície do meio filtrante;
- **filtrado:** líquido que passa através do meio filtrante
- **adjuvantes de filtração:** substâncias que atuam na filtração reduzindo a resistência ao escoamento

TABELA 7.1 PROPRIEDADES DA FIBRA PARA A SELECÇÃO DO MEIO FILTRANTE

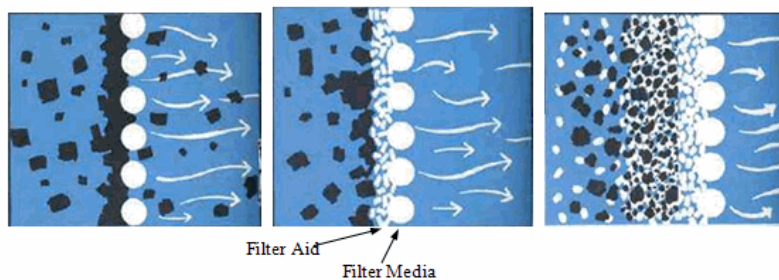
Fibra	Limite de temperatura seguro recomendado (°C)	Tenacidade Quebra a húmido	Resistência aos ácidos	Resistência às bases	Razão do preço em relação ao algodão
Algodão	100	3.3 6.4	Pobre	Razoável	1
Poliéster (Dacron)	150	6.0 8.2	Muito boa	Boa	2.7
«Dynel modacrílico»	90	3.0	Excelente	Excelente	3.2
Vidro (fiado)	400	3.0 4.6	Excelente	Razoável	6.0
Vidro (filamento contínuo)	290	3.9 4.7	Excelente	Razoável	2.2
Nylon	120	2.1 8.0	Razoável	Excelente	2.5
Acrílico (Orlon)	150	1.8 2.1	Excelente	Razoável	2.7
Polietileno	75	1.0 3.0	Excelente	Excelente	2
Polipropileno	80	3.5 8.0	Excelente	Excelente	1.75
Saran	70	1.2 2.3	Excelente	Excelente	2.5
Teflon	245	1.9	Excelente	Excelente	25.0
Cloreto de polivinilo	75	1.0 3.0	Boa	Excelente	2.7
Lã	100	0.76 1.6	Muito Boa	Razoável	3.7
Seda artificial e acetato	100	1.9 3.9	Pobre	Razoável	1

(Chemical Engineering, 70:177, 1963.)

WPO

Tamanho do poro (micron)	Partícula removida
0.2 (0.22)	Todas as bactérias
0.45	Todas as bactérias do grupo das coliformes
0.8	Todas as partículas do ar
1.2	Todas as partículas consideradas perigosas em líquidos intravenosos
5	Todas as células importantes dos fluidos corporais

Adjuvantes de Filtração



(a) Filtration without Filter Aid; (b) Filtration with "Precoat" (c) Filtration with "Admix" and "Precoat"

Fig. 1 Mechanism of Filtration with Filter Aids

Adjuvantes de Filtração

Table 6 A Comparison Between the Main Properties of the Three Main Types of Filter Aids Used in the Biotechnology Industry

Filter aid	Wet density (g cm ⁻³)	Permeability (10 ⁻⁸ cm ²)	Median pore size (μm)	Compressibility
Diatomite	0.27–0.44	0.02–25	0.5–22	Low
Perlite	0.08–0.32	0.4–8.0	6–18	Medium
Cellulose	0.10–0.38	0.4–8.3	—	High

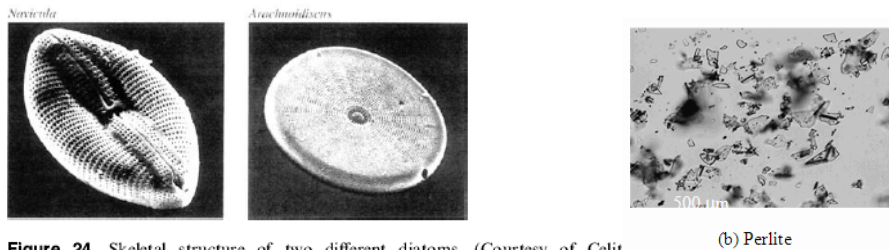


Figure 24 Skeletal structure of two different diatoms. (Courtesy of Celit Corporation.)

(b) Perlite

* Diferença: Filtração Industrial e laboratório:

- Volume do material
- Necessidade de ser realizada a um baixo custo

↳ Fatores que Afetam a Operação de Filtração.

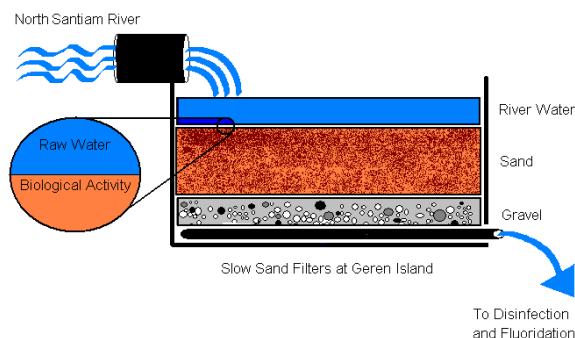
- *Influem na Seleção do Método e na Velocidade da Filtração*

- *propriedades do fluido:* Ex. densidade, viscosidade, corrosividade, etc.
- *propriedades dos sólidos:* Ex. Tamanho, forma, distribuição granulométrica, compressibilidade do material, etc.
- *o produto desejado:* Se sólido ou fluido.
- *se o sólido deve estar livre da presença do fluido.*

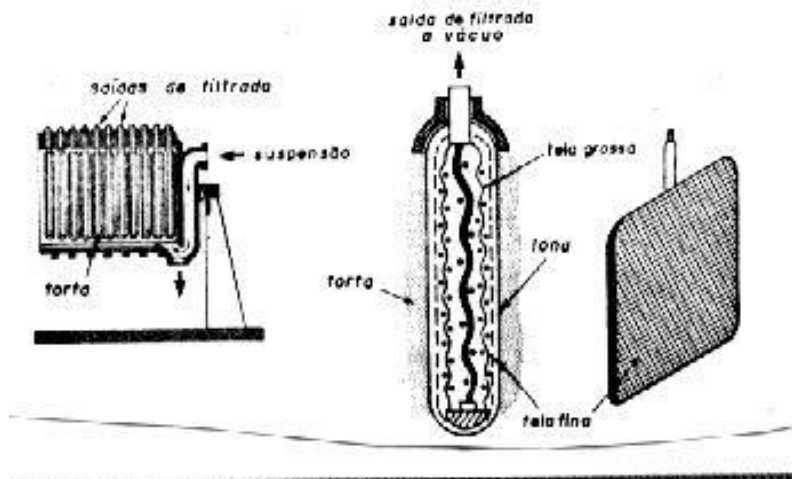
↳ Filtros Industriais

a) Filtros granulares

Compartimentos com fundo perfurado sobre o qual coloca-se um meio poroso granular (ex. pedregulho, areia, etc). O líquido é alimentado sobre o meio poroso e o filtrado é retirado pelo fundo do compartimento. Ex. tratamento de água.



b) Filtro de lâminas

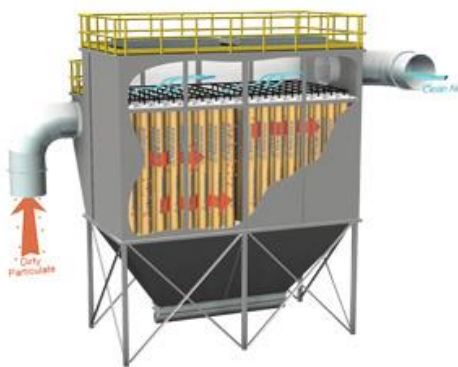


Filtro de lâminas



Filtro de lâminas

Filtro de Mangas - Bag Filters

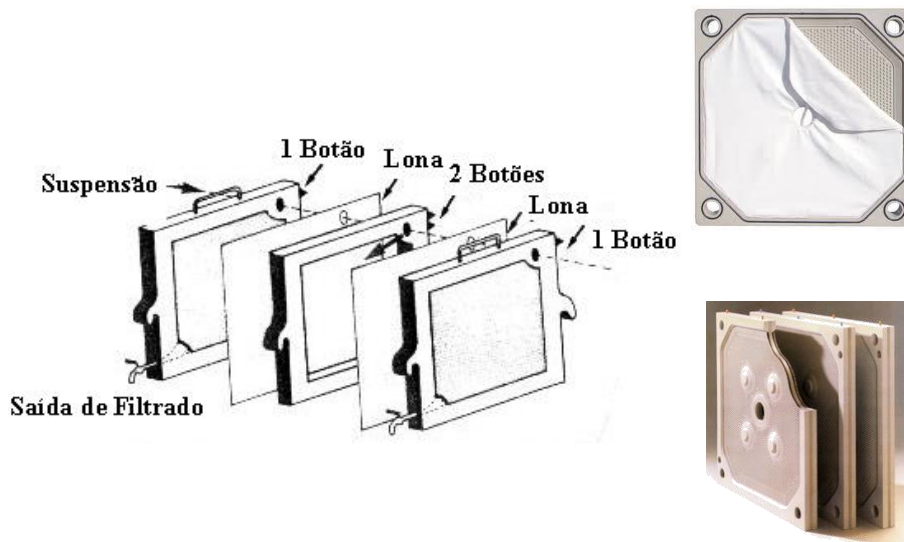


c) Filtro Prensa (de câmaras ou de placas e quadros).

↪ O tipo com maior aplicação na área farmacêutica é o de placas e quadros.

↪ Esses tipos de filtros são compostos de um conjunto de placas com face plana e bordas levemente ressaltadas. Entre duas placas sucessivas existe um quadro. De cada lado do quadro existe uma lona que encosta nas placas correspondentes.

↪ A suspensão é alimentada no intervalo entre as lonas (no quadro), e o filtrado é retirado por uma abertura existente nas placas. Após um tempo de operação deve-se parar o sistema para retirada do produto e/ou limpeza do equipamento.



Filtro Prensa

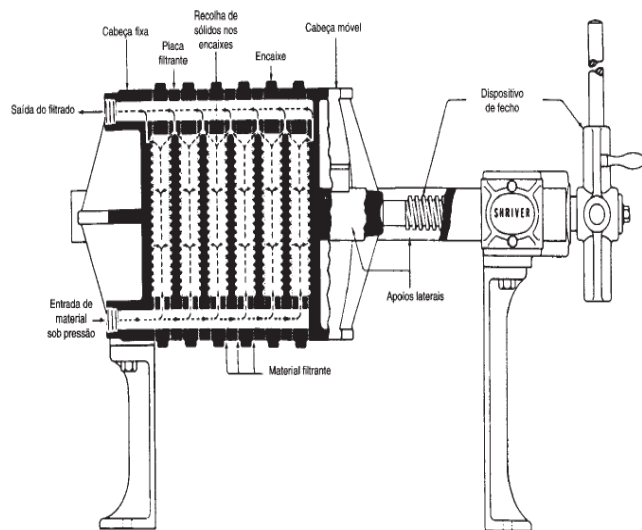
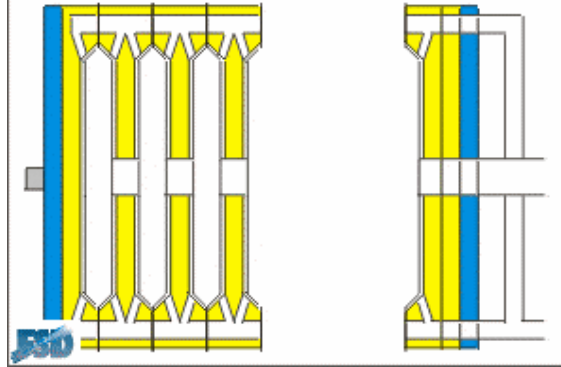


FIG. 7.13 Os filtro de placa e de caixilho, de pressão pode ter entre 10 a 100 superfícies filtrantes que podem ser cheias com bombas, ligações limpas, caixilhos perfurados ou placas divisórias para filtração em série. (Cortesia de Ertel Engineering e T. Shriver & Co. Inc.)

Filter press begins cycle in open position.



Filtro Prensa



Filtro Prensa

↳ Vantagens:

- **Construção simples.**
- **Grande área de filtração em pequeno espaço.**
- **Versatilidade.**
- **Operação com elevadas diferenças de pressão.**
- **Fácil manutenção.**

↳ Desvantagens:

- **Tempo perdido na limpeza do equipamento.**
- **Operação difícil quando os quadros estão cheios**

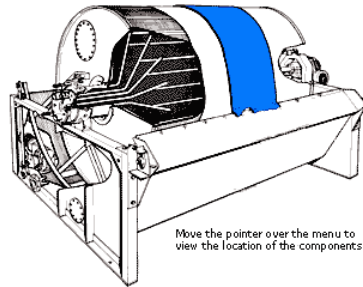
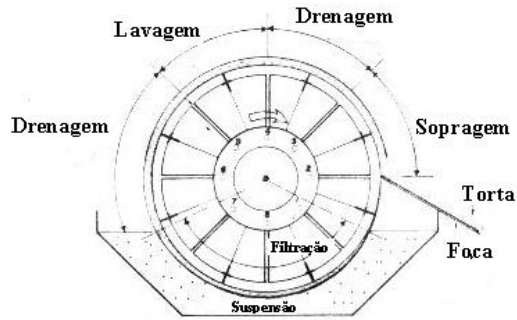
d) Filtro rotativo.

↳ **É muito utilizado na indústria farmacêutica. A pressão no interior dos compartimento e feito por válvulas reguladoras.**

Ex.

Retirada do micélio de um caldo de fermentação

Filtração



Filtro rotativo.

WPO

Filtração



Filtro rotativo.

e) Filtros de Cartucho

Filtração

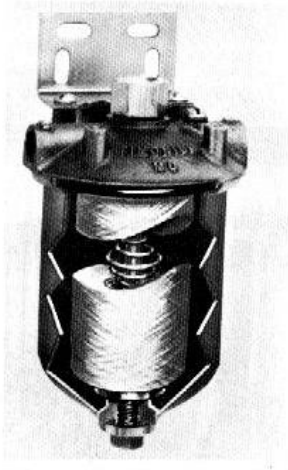


FIG. 18-9. A disposable wound cartridge is installed in holder. Liquid flows through the element and is discharged through the core. (Filterite Corporation)

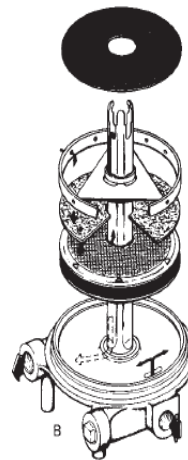
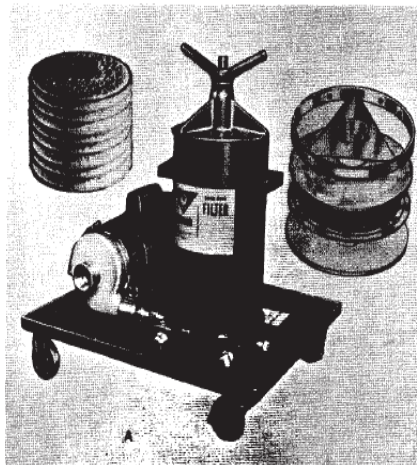
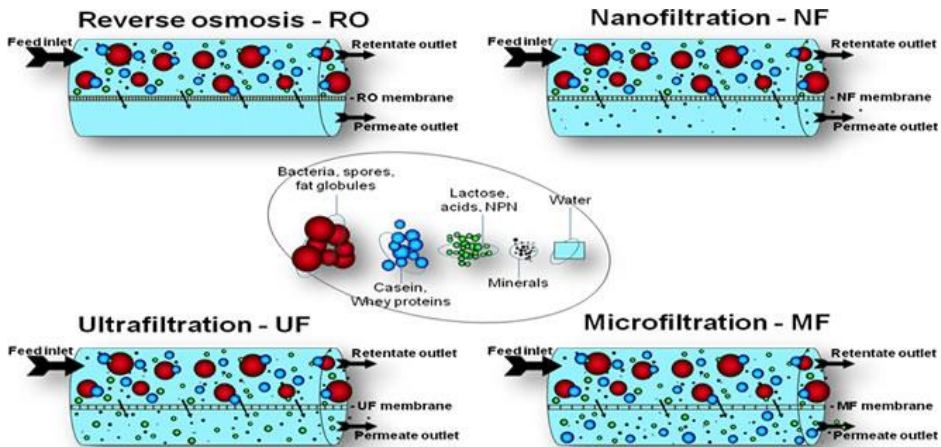


FIG. 7.14 O suporte do filtro de disco (A) leva cartuchos pré-comprimidos ou o meio filtrante do disco. O corte (B) mostra o fluxo do líquido através do disco, quando este está montado. (Cortesia de Cuno Engineering Corporation.)

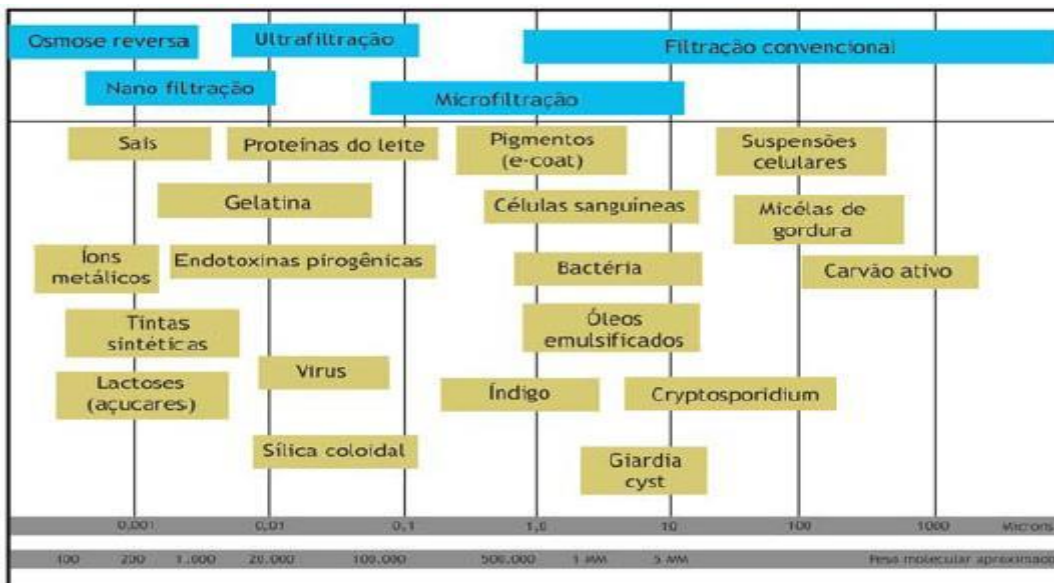
Filtro a disco

Filtração

f) Filtração por membranas (Osmose reversa, Ultrafiltração, Nanofiltração,...)



youtu.be/LkoQX7U4eoo



Faixas de retenção dos processos de separação por membranas

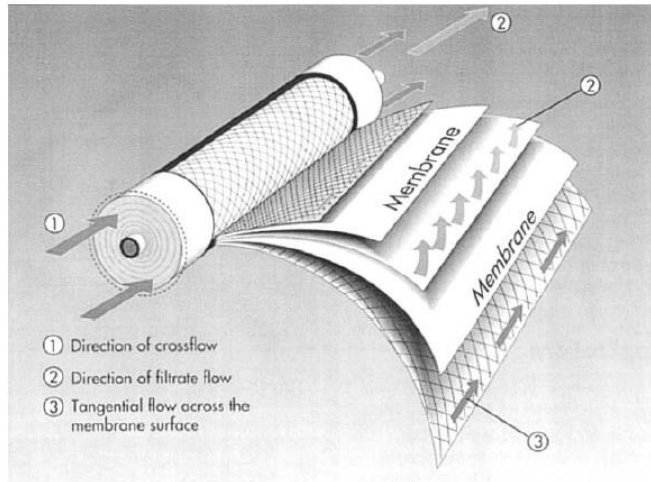


Figure 3 Spiral wound membrane module. (Schematics courtesy of Sartorius AG, Göttingen, Germany).

RANGE OF SEPARATION BY MEMBRANE PROCESSES

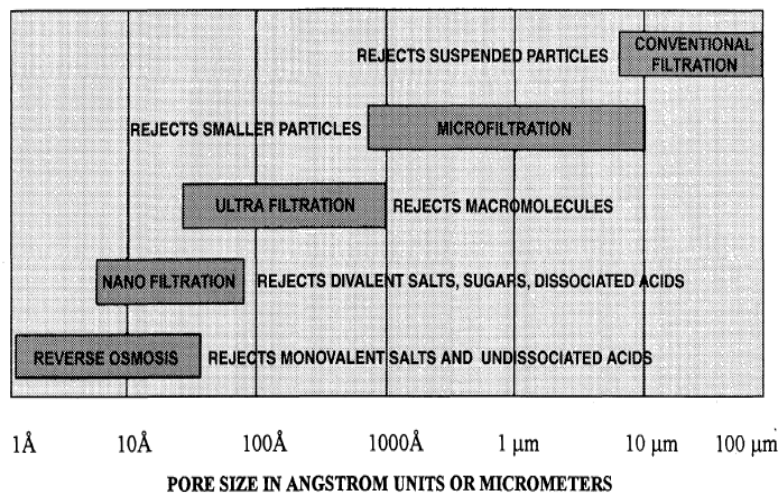


Figure 14.7. Range of separation by membrane processes.

As aplicações na indústria farmacêutica são predominantemente dirigidas para a concentração de produtos termolábeis, tais como vacinas, preparações de vírus e imunoglobulinas. A ultrafiltração também tem sido usada para recuperar antibióticos, hormonas ou vitaminas a partir de culturas de fermentação para separação de células do caldo de fermentação, para clarificação de soluções e para a remoção de contaminantes de baixo peso molecular antes de serem usadas técnicas de recuperação convencionais. A aplicação mais importante da ultrafiltração consiste na remoção de pirogénios.

↳ Tipos de Tortas de Filtração

↳ *incompressíveis*: A velocidade do fluido através da torta em cada instante não depende da posição na torta. Isso equivale a dizer que a porosidade da torta é constante.

↳ *Compressíveis*: A velocidade do fluido em cada instante varia com a posição na torta (a porosidade depende da posição na torta.

* Tipos de Operação.

↳ *Vazão de filtrado constante:* Isso ocasiona um grande incremento na diferença de pressão com o tempo de operação, exigindo bombas de maior potência (produção contínua).

↳ *Queda de pressão constante:* A vazão de filtrado diminui com o tempo de operação.

O projeto de equipamentos de filtração são baseadas em ensaios realizados em escala de laboratórios que dimensionam equipamentos até 100 vezes maiores.

↳ Outra equação que também pode ser utilizada é a Equação de Kozeny e Carman, válida para baixos valores de Reynolds (**Escoamento laminar**):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{180 \cdot \mu_f}{A \cdot D_p^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \cdot Q$$

onde,

ε é a porosidade do meio, S a área de escoamento e,

$$D_p = \frac{6}{A_p / V_p}$$

A_p = área superficial das partículas que constituem o meio;

V_p = volume das partículas que constituem o meio.

Para partículas esféricas, D_p é o diâmetro médio da partícula.

A = área transversal do escoamento

$$\therefore k = \frac{D_p^2 \cdot \varepsilon^3}{180 \cdot (1 - \varepsilon)^2}$$

↳ Teoria da Filtração.

a) *Queda de pressão durante o escoamento em meio poroso.*

Um fluido, ao passar por um meio poroso sofre uma queda de pressão devido ao atrito.

Darcy, em 1830 propôs (Escoamento Laminar: $Re \sim 1$):

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu_f}{k \cdot A} \frac{dV}{dt}$$

LEI de Darcy

ΔP = queda de pressão;

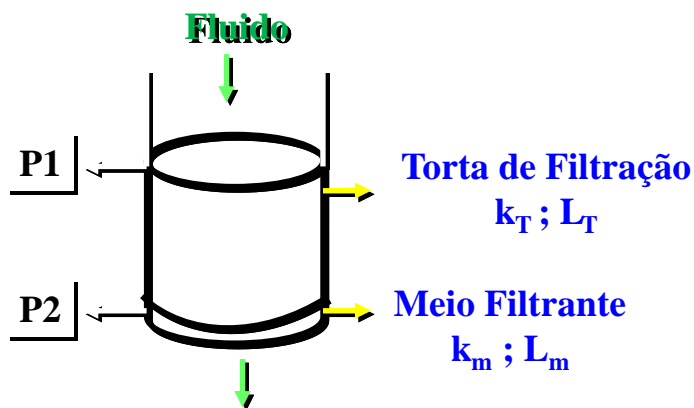
L = comprimento;

A = Área da seção transversal;

k = Permeabilidade do meio poroso, constante características do material (L^2)

$dV/dt = Q$: Vazão volumétrica do fluido através do meio poroso

↳ b) **Equação geral da Filtração**



Esquema de um processo de Filtração

↪ Aplicando a Lei a de Darcy, tem-se que (B.1):

$$\Delta P = \frac{\mu_f}{A} \left[\frac{L_T}{k_T} + \frac{L_m}{k_m} \right] \cdot \frac{dV}{dt}$$

L_T e k_T = comprimento e permeabilidade da torta de filtração;

L_m k_m = comprimento e permeabilidade do meio filtrante.

↪ Considerando-se que a quantidade de líquido presente na torta é desprezível em relação ao volume de filtrado, chega-se a:

$$s = \frac{\text{m. sólidos}}{\text{m. líquido}} = \text{conc. sól. mistura}$$

$$s = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \cdot A \cdot L_T}{\rho_f \cdot V}$$

↪ Substituindo (L_T) na equação B.1:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu_f}{A \cdot \Delta P} \cdot \left[\frac{\alpha \cdot V \cdot \rho_f \cdot s}{A} + R_m \right] \quad (\text{B.2})$$

$$\alpha = \frac{1}{k_T \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s} = \text{resistência específica da torta de filtração [m/kg]}$$

$$R_m = \frac{L_m}{k_m} = \text{resistência específica do meio filtrante [m}^{-1}\text{]}$$

WPO

↪ Se admitirmos que a torta de Filtração é incompressível, podemos integrar a Equação b.2 para os dois modos de operação

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_f}{\Delta P \cdot A} \left[\frac{\alpha \cdot \rho_f \cdot s \cdot V}{2 \cdot A} + R_m \right]$$

Queda de pressão constante

$$\Delta P = \frac{\mu_f \cdot V}{A \cdot t} \left[\frac{\alpha \cdot \rho_f \cdot s}{A} \cdot V + R_m \right]$$

Vazão constante

↪ **Projeto de filtros – Baseado em ensaios laboratório:**

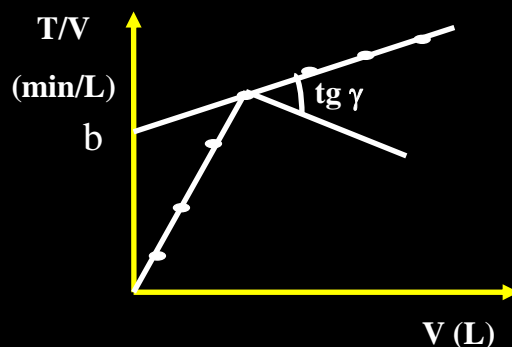
Queda de pressão constante:

- 1) Montagem de um sistema de Filtração em escala de laboratório;
- 2) Utilizar mesmos materiais nos dois sistemas;
- 3) Ajustar a pressão na bomba e iniciar o processo;
- 4) Marcar o tempo percorrido e coletar o volume de filtrado.

5) Construir o gráfico t/V em função de V .

$t/V = 5, 10; 30; 50; \dots$

$V = 30, 43, 32, 22, \dots$



$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\mu_f \alpha \rho_f S}{2 A^2 \Delta P}$$

$$b = \frac{\mu_f R_m}{A \Delta P}$$

Fig. - Gráfico usado no projeto de Filtros à queda pressão constante

-Substituir α e R_m e outros dados na eq. filtração e resolver para determinar A escala maior

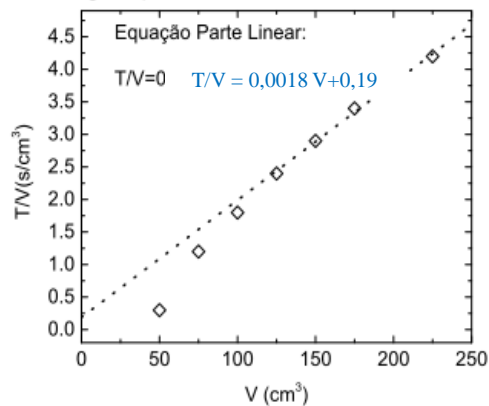
6) Construindo-se um gráfico de t/V em função de V , pode-se determinar os parâmetros α e R_m , que podem ser usados no projeto de filtros com tamanho de até 100 vezes a dimensão do Filtro usado no laboratório. O mesmo meio filtrante, e mesmas condições operacionais devem ser mantidas nos dois equipamentos.

<http://www.ufrnet.ufrn.br/~lair/Pagina-OPUNIT/opunitindex.htm>

5) Você necessita projetar um filtro industrial que opere à pressão constante de 400 mm Hg, para processar 7000 lbm/h de uma suspensão aquosa de CaCO_3 a concentração de 50 g/l. Você decidiu realizar um ensaio em escala de laboratório com um filtro com diâmetro de 50 mm. Foram obtidos os seguintes resultados. Sabendo-se que a viscosidade da água é de 1 cp, e a densidade é de 1 g/cm^3 , calcule a área do filtro industrial. (Assumir que a densidade da suspensão aquosa de CaCO_3 é de $1,2 \text{ g/cm}^3$).

Tabela 1. Ensaio de filtração.

T (s)	V (cm ³)	T/V (s/cm ³)
15	50	0.3
90	75	1.2
180	100	1.8
300	125	2.4
435	150	2.9
595	175	3.4
760	200	3.8
945	225	4.2



$$\frac{t}{V} = \frac{\mu_f}{\Delta P \cdot A} \left[\frac{\alpha \cdot \rho_f \cdot S \cdot V}{2 \cdot A} + R_m \right] \rightarrow \text{Equação grau 2 em A} \rightarrow \text{Fórmula de Bhaskara} \rightarrow \frac{+A}{-A}$$