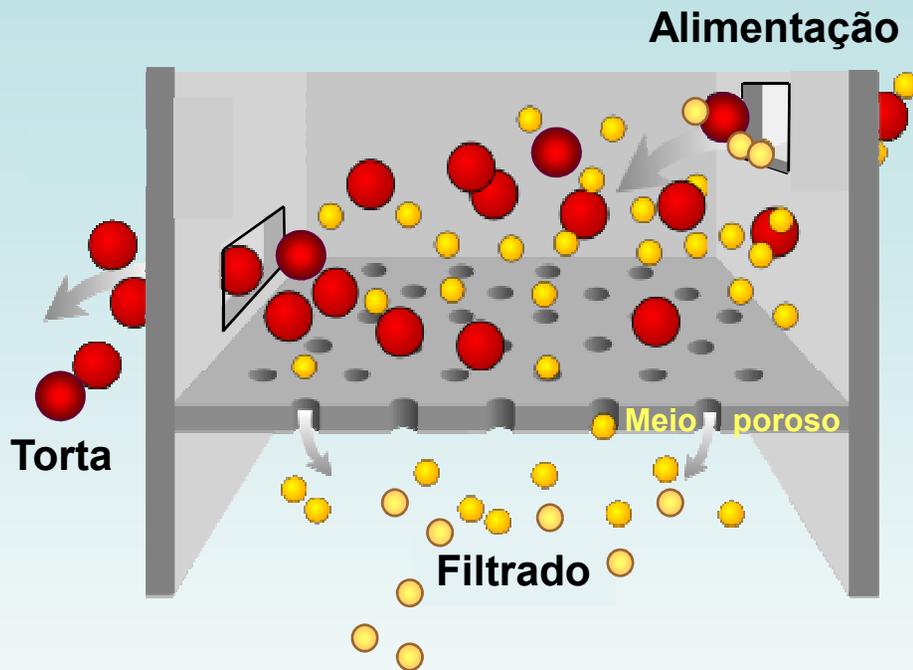


**ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

# **Filtração**

# FILTRAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO



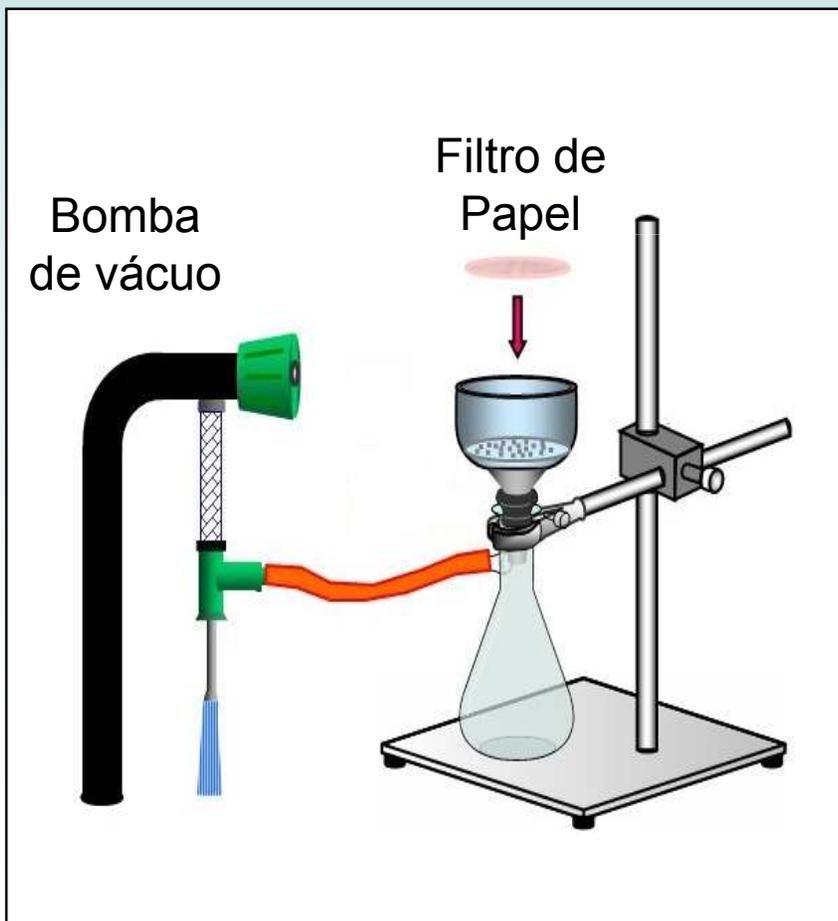
Na filtração, as partículas sólidas suspensas em um fluido são separadas usando um **meio poroso**.

Ele separa as partículas em uma fase sólida (“**torta**”) e permite o escoamento de um fluido claro (“**filtrado**”).

O fluido pode ser um gás ou um líquido.

O produto pode ser tanto o fluido clarificado quanto a torta de partículas sólidas.

O princípio da **filtração industrial** e o do **equipamento de laboratório** é o mesmo, apenas muda a quantidade de material a ser filtrado.



O aparelho de **filtração de laboratório** mais comum é denominado filtro de Büchner.

O líquido é colocado por cima e flui por ação da gravidade e no seu percurso encontra um tecido poroso (um filtro de papel).

Como a resistência à passagem pelo meio poroso aumenta no decorrer do tempo, usa-se um vaso Kitasato conectado a uma bomba de vácuo.

Os filtros industriais podem ser feitos para funcionar: **em batelada** (a torta é retirada depois de cada corrida) ou de forma **contínua** (a torta sólida é retirada continuamente).

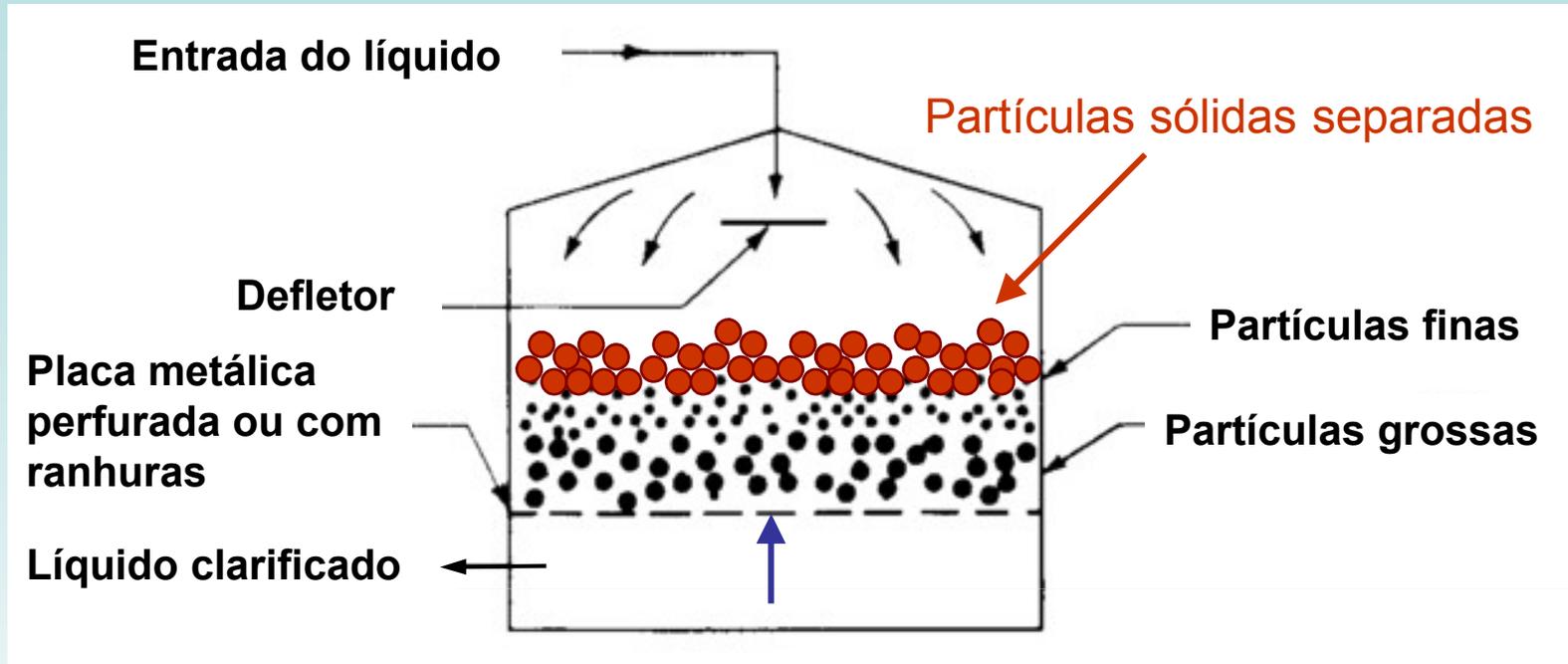
Os filtros podem funcionar:

- por ação da **gravidade**, o líquido flui devido a existência de uma coluna hidrostática;
- por ação de **força centrífuga**;
- por meio da aplicação de **pressão ou vácuo** para aumentar a taxa de fluxo.

O meio de filtração pode ser:

- um **leito poroso** de materiais sólidos inertes,
- um conjunto de **placas, marcos e telas** em uma prensa,
- um conjunto de **folhas duplas** dentro de um tanque,
- um **cilindro rotativo** mergulhado na suspensão,
- ou **discos rotativos** mergulhados na suspensão.
- ou **bolsas ou cartuchos** dentro de uma carcaça.

# Filtros de leito fixo



O tipo de filtro mais simples.

Se usa no tratamento de água potável, quando se tem grandes volumes de líquido e pequenas quantidades de sólidos.

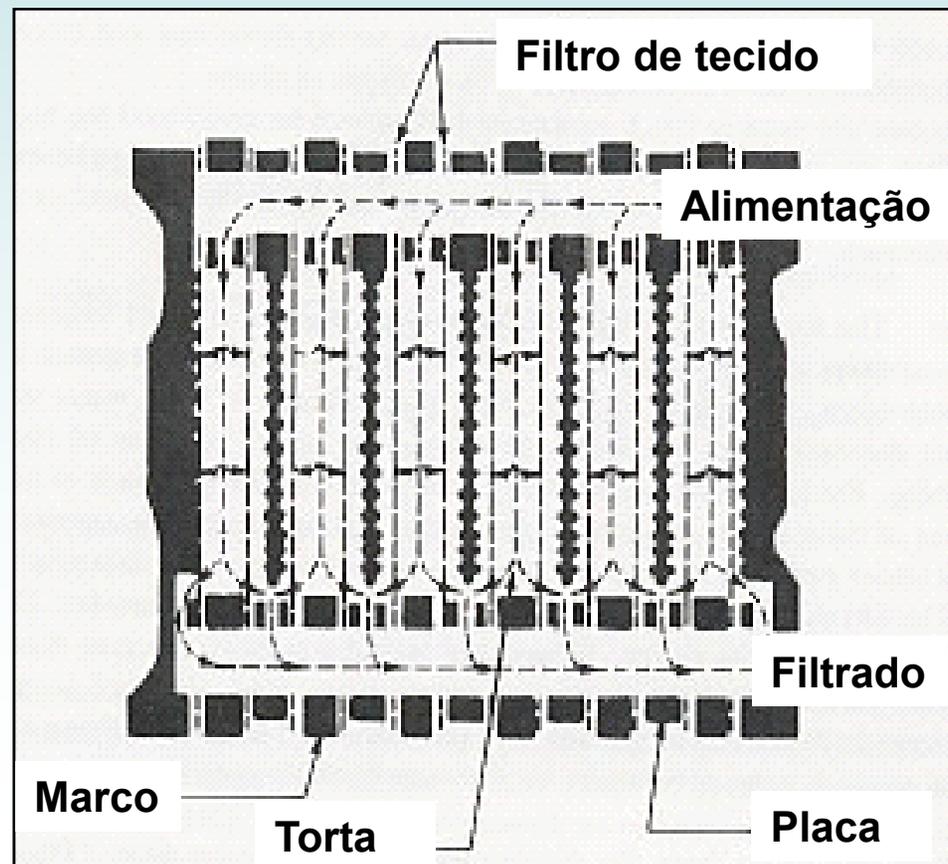
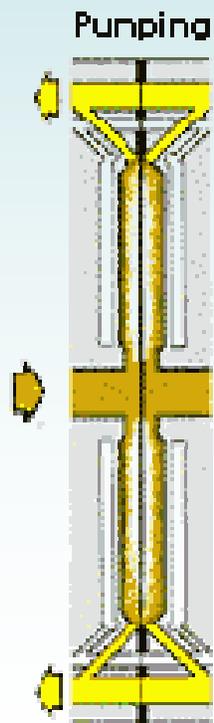
A camada de fundo é composta de **cascalho grosso** que descansa em uma placa perfurada ou com ranhuras. Acima do cascalho é colocada **areia fina** que atua realmente como filtro.

# Filtro prensa

Um dos tipos mais usados na indústria.

Usam **placas** e **marcos** colocados em forma alternada.

Utiliza-se **tela** (tecido de algodão ou de materiais sintéticos) para cobrir ambos lados das placas.



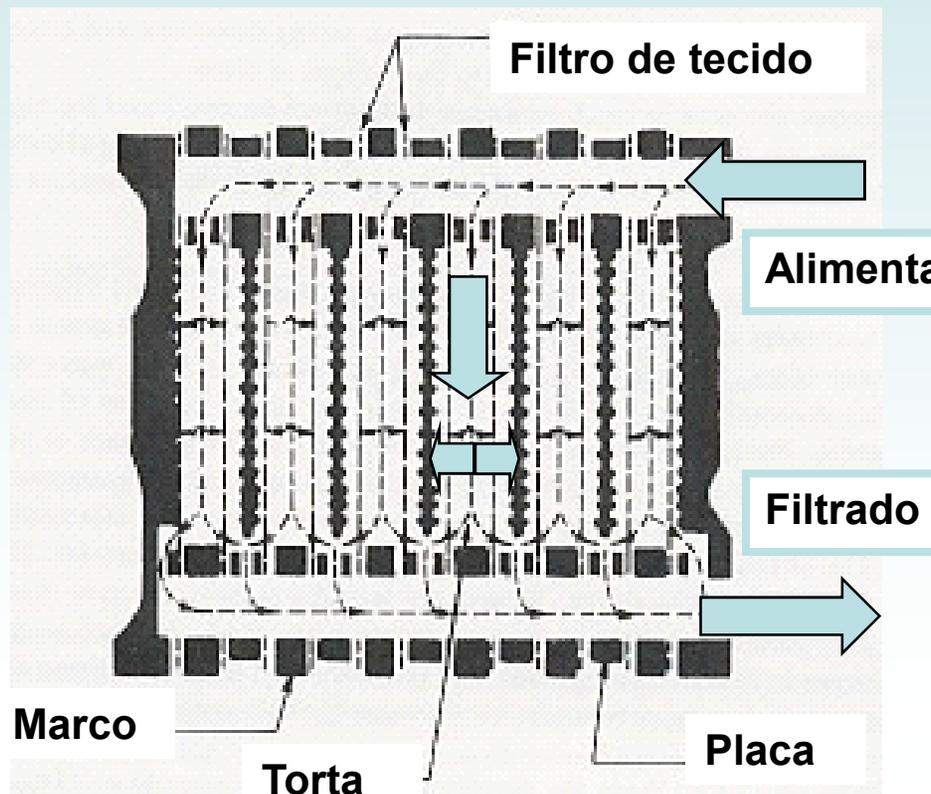
# Filtro-Prensa



A alimentação é bombeada à prensa e flui pelas armações.

Os sólidos acumulam-se como “torta” dentro da armação.

O filtrado flui entre o filtro de tecido e a placa pelos canais de passagem e sai pela parte inferior de cada placa.



A filtração prossegue até o espaço interno da armação esteja completamente preenchida com sólidos.

Nesse momento a armação e as placas são separadas e a torta retirada. Depois o filtro é remontado e o ciclo se repete.

## Filtros de “folhas”

Foi projetado para **grandes volumes** de líquido e para ter uma lavagem eficiente.

Cada folha é uma armação de metal oca coberta por um filtro de tecido. Elas são suspensas em um tanque fechado.

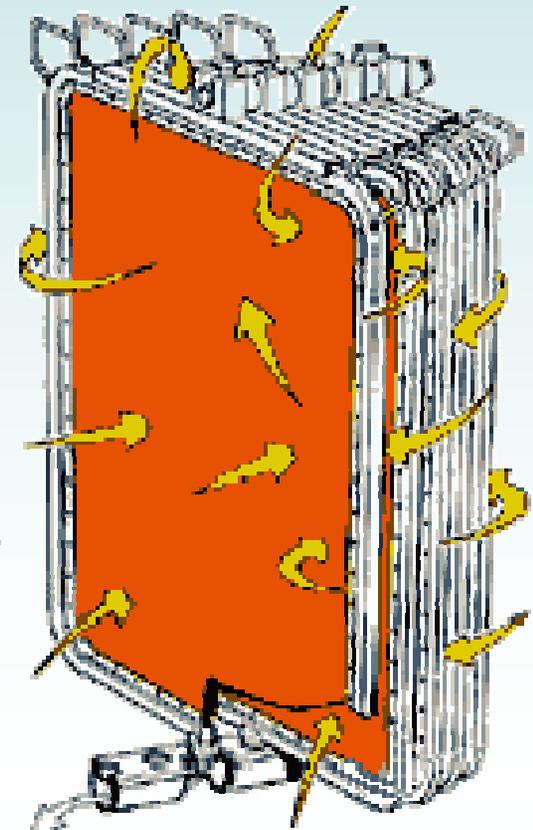
A alimentação é introduzida no tanque e passa pelo tecido a baixa pressão.

A torta se deposita no exterior da folha.

O filtrado flui para dentro da armação oca.

Após a filtração, ocorre a limpeza da torta. O líquido de lavagem entra e segue o mesmo caminho que a alimentação.

A torta é retirada por uma abertura do casco.



# Filtros de folhas



## Filtro de tambor a vácuo, rotativo e contínuo.

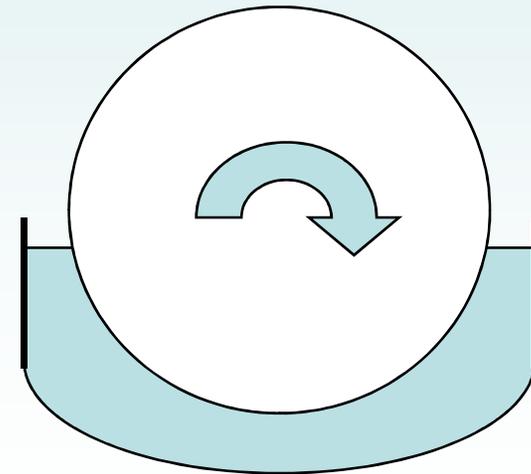
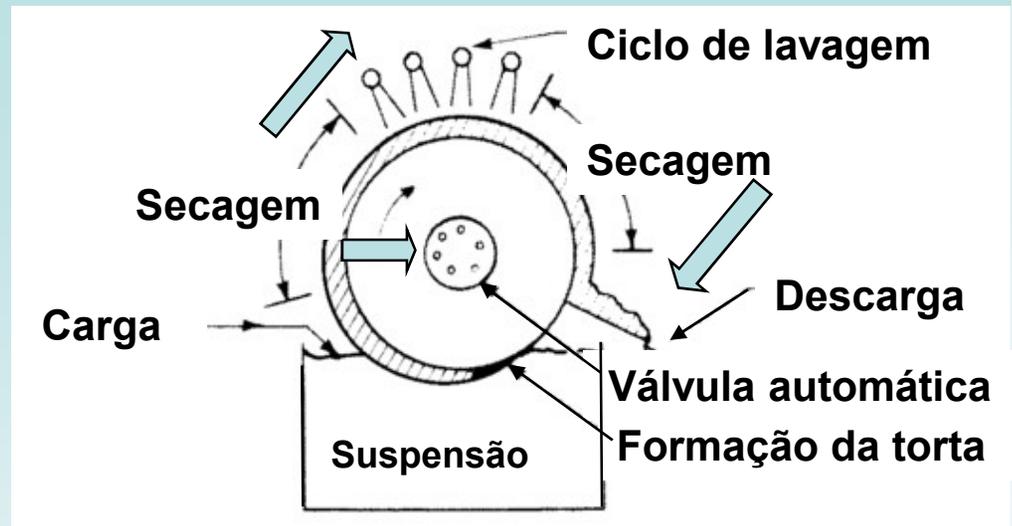
Ele filtra, lava e descarrega a torta de forma contínua.

O tambor é recoberto com um meio de filtração conveniente. Uma válvula automática no centro do tambor ativa o ciclo de filtração, secagem, lavagem e retirada da torta.

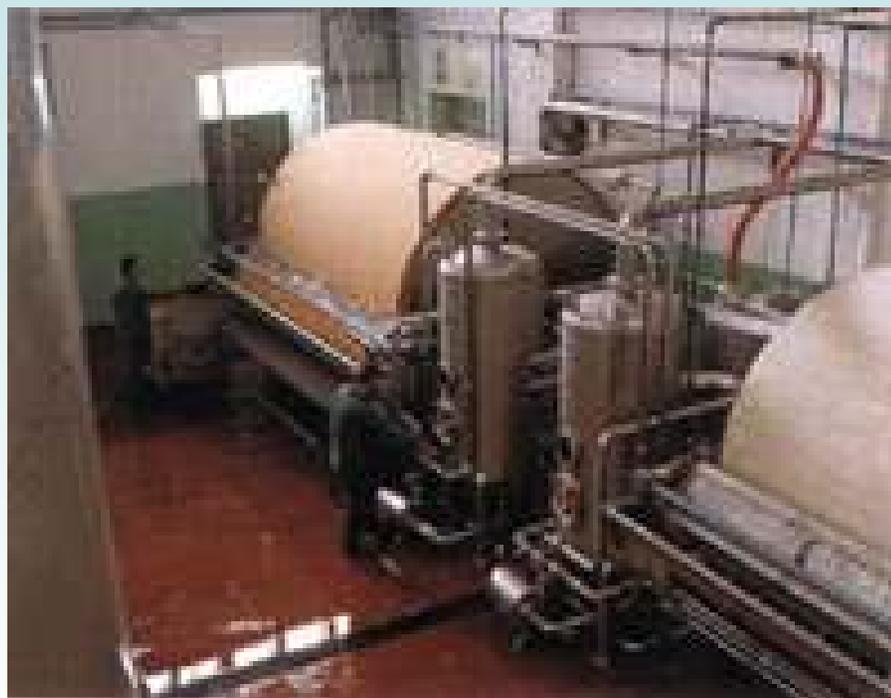
O filtrado sai pelo eixo de rotação.

Existem passagens separadas para o filtrado e para o líquido de lavagem.

Há uma conexão com ar comprimido que se utiliza para ajudar a raspadeira de facas na retirada da torta.



## Filtro de tambor a vácuo, rotativo e contínuo.



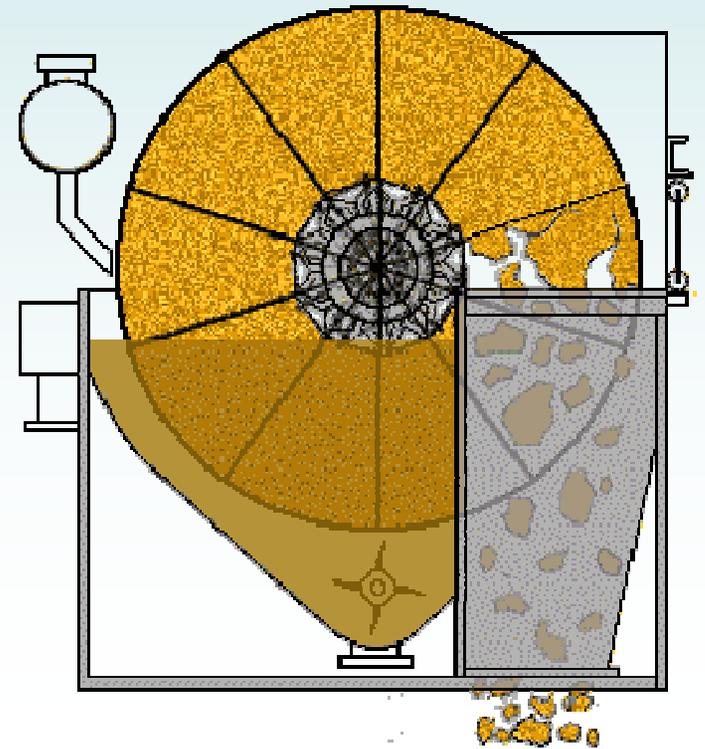
## Filtro de tambor a vácuo, rotativo e contínuo.



# Filtro contínuo de discos rotativos

É um conjunto de discos verticais que giram em um eixo de rotação horizontal. Este filtro combina aspectos do filtro de tambor rotativo a vácuo e do filtro de folhas.

Cada disco (folha) é oco e coberto com um tecido e é em parte submerso na alimentação. A torta é lavada, secada, e raspada quando o disco gira.



# Filtro de Cartucho

O filtro de cartucho é de operação contínua e limpeza automática. É composto de uma carcaça onde se colocam cartuchos (ou bolsas).

O gás “sujo” é forçado a passar através dos cartuchos, em cuja superfície as partículas são retidas.

O gás limpo é conduzido à parte interna do filtro e em seguida ao exaustor.

O processo de limpeza do cartucho é feito automaticamente através de pulsos de ar comprimido.



# Meios de Filtração e Auxiliares de Filtração

## 1. Meios de filtração.

O meio para filtração industrial deve:

- Retirar o sólido a ser filtrado da alimentação e gerar um filtrado claro.
- Permitir que a torta com filtro seja removida de forma fácil e limpa.
- Ser forte o suficiente para não rasgar e ser quimicamente resistente às soluções usadas.
- Para que a taxa da filtração não fique muito lenta os poros devem ficar livres e não ser obstruídos.

## 2. Auxiliares de Filtração

Certos compostos podem ser usados para ajudar a filtração, como a **terra de diatomáceas** que é formada principalmente de sílica. Também são empregados a celulose de madeira e outros sólidos porosos inertes.

Esses compostos podem ser usados de vários modos:

### 1. Como pré-cobertura antes da filtração.

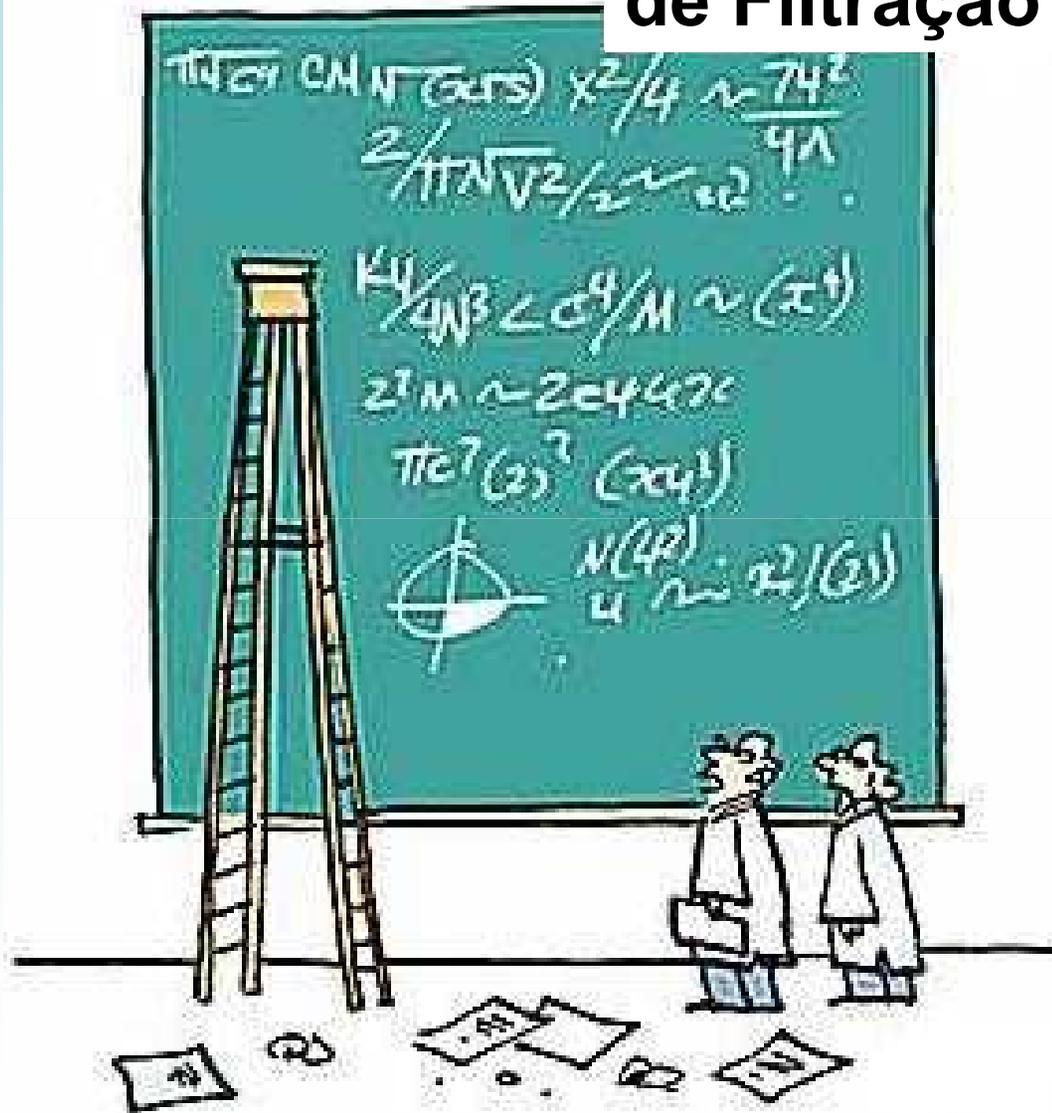
O auxiliar de filtração prevenirá os sólidos gelatinosos de entupir o filtro e também permitirá um filtrado mais claro.

### 2. Acrescentados à alimentação antes da filtração.

Aumenta a porosidade da torta e reduz a resistência da torta durante a filtração.

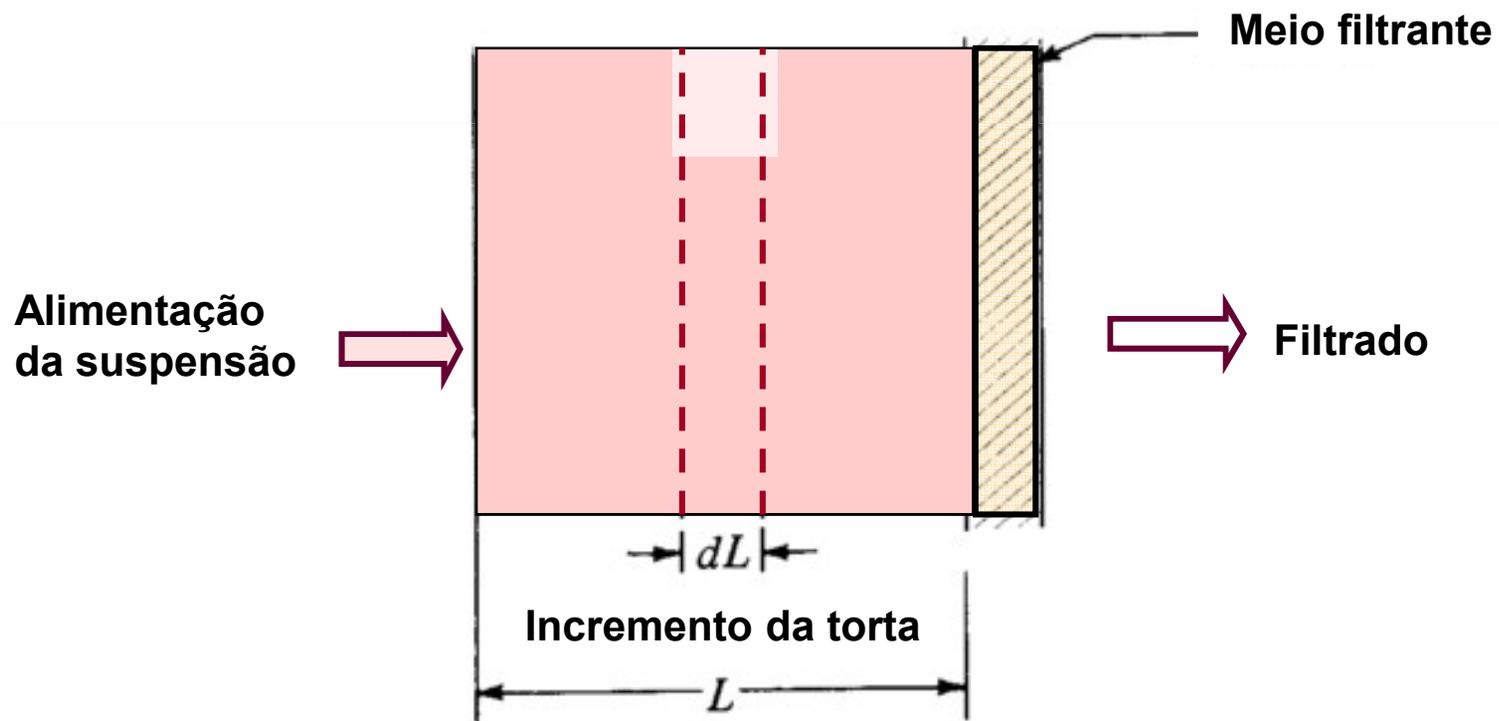
**3. Em um filtro rotativo, o auxiliar de filtração pode ser aplicado como uma pré-cobertura.** Posteriormente, as fatias finas desta camada são cortadas junto com a torta.

# Teoria Básica de Filtração



# 1. Queda de pressão de fluido através da torta

A figura mostra uma seção de um filtro em um tempo  $t$  (s) medido a partir do início do fluxo. A espessura da torta é  $L$  (m). A área da seção transversal é  $A$  (m<sup>2</sup>), e a velocidade linear do filtrado na direção  $L$  é  $v$  (m/s)



A **equação de Poiseuille** explica o fluxo laminar em um tubo, que no sistema internacional de unidades (SI) pode ser descrito como:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32\mu v}{D^2}$$

Onde:

$\Delta p$  é a pressão (N/m<sup>2</sup>)

$v$  é a velocidade no tubo (m/s)

$D$  é o diâmetro (m)

$L$  é o comprimento (m)

$\mu$  é a viscosidade (Pa.s)

No caso de **fluxo laminar** em um **leito empacotado** de partículas se usa a equação de **Carman-Kozeny**, que já foi vista ao estudar a operação de Fluidização. Ela tem sido aplicada à filtração com sucesso:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{32 \mu v}{D^2}$$

$$\frac{\Delta p_c}{L} = \frac{k_1 \mu v (1 - \varepsilon)^2 S_0^2}{\varepsilon^3}$$

Onde:

$k_1$  é uma constante para partículas de tamanho e forma definida

$\mu$  é a viscosidade do filtrado em Pa.s

$v$  é a velocidade linear em m/s

$\varepsilon$  é a **porosidade da torta**

$L$  é a espessura da torta em m

$S_0$  é a **área superficial específica** expressa em  $m^2 / m^3$

$\Delta P_c$  é a diferença de pressão na torta  $N/m^2$

A **velocidade linear** é baseada na área da seção transversal vazia:

$$v = \frac{dV / dt}{A}$$

Onde:

A é a área transversal do filtro (m<sup>2</sup>)

V é o volume coletado do filtrado em m<sup>3</sup> até o tempo t (s).

A espessura da torta  $L$  depende do volume do filtrado  $V$  e se obtém por um balanço de materiais.

$$m_p = c_s V_{total}$$

$$LA(1 - \varepsilon) \rho_p = c_s (V + \varepsilon LA)$$

Onde:

$c_s =$  kg de sólidos/ $m^3$  do filtrado,

$\rho_p$  é a densidade de partículas sólidas na torta em  $kg/m^3$

$$L = \frac{c_s (V + \varepsilon LA)}{A(1 - \varepsilon) \rho_p}$$

$$v = \frac{dV / dt}{A}$$

$$\frac{\Delta p_c}{L} = \frac{k_1 \mu v (1 - \varepsilon)^2 S_0^2}{\varepsilon^3}$$

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_c}{\frac{k_1 (1 - \varepsilon) S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3} \frac{\mu c_s V}{A}}$$

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu c_{sV}}{A}}$$

**Para a resistência do leito temos:**

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu c_{sV}}{A}}$$

Onde  $\alpha$  é a resistência específica da torta (m/kg) definida como:

$$\alpha = \frac{k_1(1-\varepsilon)S_0^2}{\rho_p \varepsilon^3}$$

**Para a resistência da tela filtrante, podemos usar a Equação de Darcy:**

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_f}{\mu R_m}$$

Onde:

$R_m$  é a resistência ao fluxo do meio filtrante ( $m^{-1}$ )

$\Delta P_f$  é a queda de pressão no filtro

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_c}{\alpha \frac{\mu c_{sV}}{A}}$$

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p_f}{\mu R_m}$$

Como as resistências da torta e do meio filtrante estão em série, podem ser somadas:

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\mu \left( \frac{\alpha c_s V}{A} + R_m \right)}$$

Onde  $\Delta p = \Delta p_c$  (torta) +  $\Delta p_f$  (filtro)

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\mu \left( \frac{\alpha c_s V}{A} + R_m \right)}$$

A equação anterior pode ser invertida para dar:

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A (-\Delta p)} R_m \longrightarrow \frac{dt}{dV} = K_p V + B$$

Onde  $K_p$  está em  $s/m^6$  e  $B$  em  $s/m^3$ :

$$K_p = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)}$$

## Filtração à pressão constante

Para pressão constante e  $\alpha$  constante (torta incompressível), **V e t são as únicas variáveis.**

$$\frac{dt}{dV} = \frac{\mu\alpha_s}{A^2(-\Delta p)} V + \frac{\mu}{A(-\Delta p)} R_m$$

$$\frac{dt}{dV} = K_p V + B$$

**Integração para obter o tempo da filtração t em (s):**

$$\int_0^t dt = \int_0^V (K_p V + B) dV \longrightarrow t = \frac{K_p}{2} V^2 + BV$$

Dividindo por V:

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B$$

Onde V é o volume total do filtrado (m<sup>3</sup>) reunido em t (s)

Para saber o tempo de filtração é necessário conhecer  $\alpha$  e  $R_m$ .

$$t = \frac{K_p}{2} V^2 + BV$$

$$K_p = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)}$$

Para isso, posso utilizar a equação dividida por V:

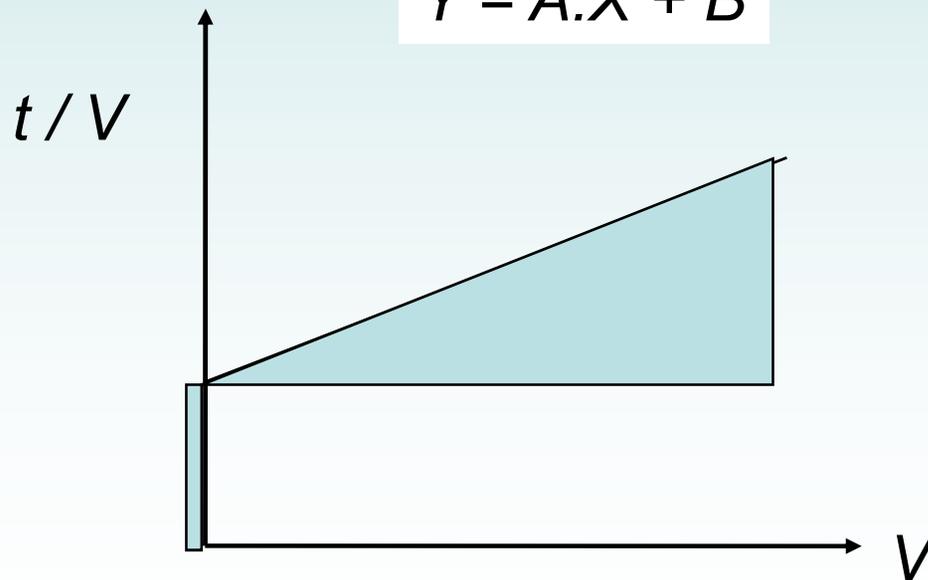
$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B$$

E traçar um gráfico de  $t/V$  versus V

Preciso dos dados de volume coletado ( $V$ ) em tempos diferentes de filtração.

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B$$

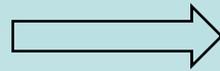
$$Y = A.X + B$$



$$\frac{K_p}{2} = \frac{1}{2} \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)}$$

$$\frac{t}{V} = \frac{K_p}{2} V + B$$



$K_p$  = coeficiente angular da reta

$B$  = coeficiente linear da reta

$$\frac{K_p}{2} = \frac{1}{2} \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)}$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)}$$

Com  $K_p$  e  $B$  pode-se determinar diretamente o tempo de filtração.

$$t = \frac{K_p}{2} V^2 + BV$$

Porém o cálculo de  $\alpha$  (resistência específica da torta) e de  $R_m$  (resistência do meio filtrante) permite obter a equação do tempo de filtração em termos dos parâmetros básicos da operação

$$t = \frac{\mu \alpha c_s}{2 A^2 (-\Delta p)} V^2 + \frac{\mu R_m}{A (-\Delta p)} V$$

## **Exercício:**

### **Avaliação das Constantes para Filtração à Pressão Constante**

Contam-se com os dados da filtração em laboratório de uma suspensão de  $\text{CaCO}_3$  em água a 298,2 K (25°C) e a uma pressão constante ( $-\Delta p$ ) de 338 kN /m<sup>2</sup>.

Área do filtro prensa de placa-e-marco

$$A = 0,0439 \text{ m}^2$$

Concentração de alimentação

$$c_s = 23,47 \text{ kg/m}^3$$

**Calcule as constantes  $\alpha$  e  $R_m$  a partir dos dados experimentais de volume de filtrado (m<sup>3</sup>) versus tempo de filtração (s). Estime o tempo necessário para filtrar 1m<sup>3</sup> da mesma suspensão em um filtro industrial com 1m<sup>2</sup> de área. Se o tempo limite para essa filtração fosse de 1h, qual deveria ser a área do filtro?**

Tempo (s)	Volume (m <sup>3</sup> )
4,4	0,498 x 10 <sup>-3</sup>
9,5	1,000 x 10 <sup>-3</sup>
16,3	1,501 x 10 <sup>-3</sup>
24,6	2,000 x 10 <sup>-3</sup>
34,7	2,498 x 10 <sup>-3</sup>
46,1	3,002 x 10 <sup>-3</sup>
59,0	3,506 x 10 <sup>-3</sup>
73,6	4,004 x 10 <sup>-3</sup>
89,4	4,502 x 10 <sup>-3</sup>
107,3	5,009 x 10 <sup>-3</sup>

$$A = 0,0439 \text{ m}^2$$

$$c_s = 23,47 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 8,937 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$$

(água a 298,2 K)

$$(-\Delta p) = 338 \text{ kN/m}^2$$

$$B = \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)}$$

$$K_p = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2(-\Delta p)}$$

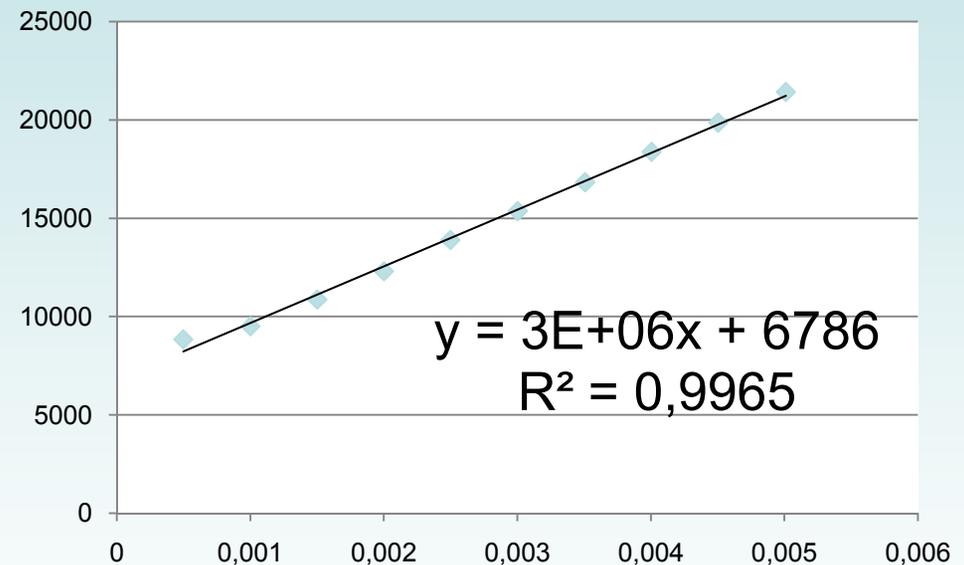
$$t = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2(-\Delta p)} V^2 + \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)} V$$

# Solução:

Dados são usados para obter  $t/V$

t	V x 10 <sup>3</sup>	(t/V) x 10 <sup>-3</sup>
4,4	0,498	8,84
9,5	1,000	9,50
16,3	1,501	10,86
24,6	2,000	12,30
34,7	2,498	13,89
46,1	3,002	15,36
59,0	3,506	16,83
73,6	4,004	18,38
89,4	4,502	19,86
107,3	5,009	21,42

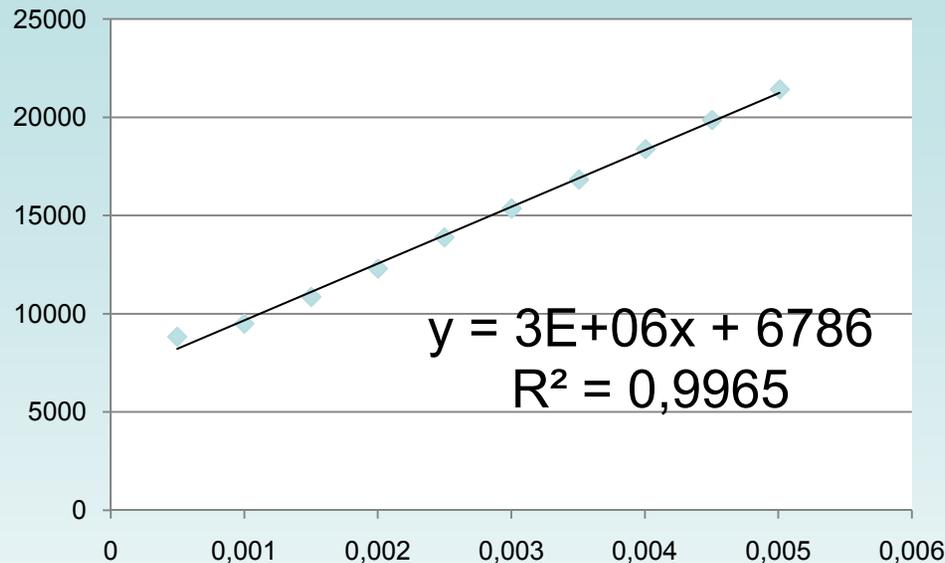
$t/V$



V

## Solução:

Dados são usados para obter  $t/V$



$$\frac{\Delta Y}{\Delta X} \cong 3000000$$

$$Y = 3 \times 10^6 X + B$$

$$B = 6400 \text{ s/m}^3$$

$$K_p/2 = 3,00 \times 10^6 \text{ s/m}^6$$

$$K_p = 6,00 \times 10^6 \text{ s/m}^6$$

$$K_p = 6,00 \times 10^6 = \frac{\mu \alpha c_s}{A^2 (-\Delta p)} = \frac{(8,937 \times 10^{-4})(\alpha)(23,47)}{(0,0439)^2 (338 \times 10^3)}$$

$$\alpha = 1,863 \times 10^{11} \text{ m/kg}$$

$$B = 6400 = \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)} = \frac{(8,937 \times 10^{-4})(R_m)}{0,0439 (338 \times 10^3)}$$

$$R_m = 10,63 \times 10^{10} \text{ m}^{-1}$$

## Solução:

$$t = \frac{\mu \alpha c_s}{2A^2(-\Delta p)} V^2 + \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)} V$$

$$t = \frac{(8,937 \times 10^{-4})(1,863 \times 10^{11})(23,47)}{2 \times 1^2 \times (338 \times 10^3)} 1^2 + \frac{(8,937 \times 10^{-4})(10,63 \times 10^{10})}{1(338 \times 10^3)} 1$$

$$t = 6061,78 \text{ segundos} = 1,68 \text{ horas}$$

## Solução:

$$t = \frac{\mu \alpha c_s}{2A^2(-\Delta p)} V^2 + \frac{\mu R_m}{A(-\Delta p)} V$$

$$t = \frac{5710}{A^2} + \frac{286}{A}$$

$$t = 3600 \text{ s}$$

$$3600A^2 - 286A - 5710 = 0$$

$$A = 1,3m^2$$

## Compressibilidade da torta

Torta incompressível ( $\alpha = \text{constante}$ ): um aumento na vazão acarreta em um aumento proporcional da queda de pressão ( $-\Delta p$ ), ou seja, para dobrar a vazão da filtração, deve-se dobrar ( $-\Delta p$ ).

$$\frac{dV}{A dt} = \frac{-\Delta p}{\mu \left( \frac{\alpha c_s V}{A} + R_m \right)}$$

Torta compressível ( $\alpha = f(-\Delta p)$ ): um aumento na vazão acarreta em um aumento maior que o proporcional da queda de pressão ( $-\Delta p$ ), ou seja, para dobrar a vazão da filtração, deve-se utilizar uma ( $-\Delta p$ ) maior que o dobro.

Equação empírica comumente utilizada:

$$\alpha = \alpha_0 (-\Delta p)^s$$

$s$  é o fator de compressibilidade varia entre 0,2 e 0,8, na prática.

$s = 0$  para torta incompressível

## Exercício:

Filtrações a pressão constante foram realizadas para uma suspensão de  $\text{CaCO}_3$  em  $\text{H}_2\text{O}$  sendo obtidos os resultados apresentados na tabela. A superfície total de filtração foi  $440 \text{ cm}^2$ , a massa de sólidos por volume de filtrado foi de  $23,5 \text{ g/L}$  e a temperatura foi de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $\mu_{\text{H}_2\text{O}} = 0,886 \times 10^{-3} \text{ kg}/[\text{m s}]$ ). Calcule os valores de  $\alpha$  e  $R_m$  em função da diferença de pressão e elabore uma correlação empírica entre  $\alpha$  e  $\Delta P$ .

Experimento:	1	2	3	4	5
$\Delta P$	$5 \times 10^4$	$1 \times 10^5$	$2 \times 10^5$	$4 \times 10^5$	$8 \times 10^5$
V(L)	t1	t2	t3	t3	t5
0,5	13,7	8,2	4,9	2,9	1,7
1	46,7	28,2	17,2	10,4	6,3
1,5	99,1	60,2	36,7	22,3	13,6
2	170,8	104,1	63,7	38,8	23,6
2,5	261,8	159,9	97,9	59,8	36,5
3	372,2	227,5	139,4	85,3	52,1
3,5		307,1	188,3	115,3	70,5
4		398,6	244,5	149,8	91,7
4,5			308,1	188,8	115,6
5			378,9	232,3	142,4
5,5				280,4	171,9
6				332,9	204,1

## Solução:

V	t1/V	t2/V	t3/V	t4/V	t5/V
0,0005	27391	16333	9844	5870	3481
0,001	46728	28236	17172	10380	6258
0,0015	66065	40140	24499	14891	9034
0,002	85402	52043	31826	19401	11811
0,0025	104739	63946	39153	23912	14587
0,003	124076	75849	46481	28422	17364
0,0035		87753	53808	32933	20140
0,004		99656	61135	37443	22917
0,0045			68463	41953	25693
0,005			75790	46464	28470
0,0055				50974	31247
0,006				55485	34023

*Regressão linear:*

$$t/V = K_p V + B \rightarrow K_p = c \alpha \mu / (2A^2 \Delta p), B = R_m \mu / (A \Delta p)$$

$$\alpha = \alpha_0 \Delta p^s \rightarrow \log(\alpha) = \log(\alpha_0) + s \log(\Delta p)$$

## Solução:

*Regressão linear:*

$$t/V = K_p V + B \rightarrow K_p = c \alpha \mu / (2A^2 \Delta p), B = R_m \mu / (A \Delta p)$$

$$\alpha = \alpha_0 \Delta p^s \rightarrow \log(\alpha) = \log(\alpha_0) + s \log(\Delta p)$$

---

$\Delta P$	$K_p$ (s/m <sup>6</sup> )	$B$ (s/m <sup>3</sup> )	$\alpha$ (m/kg)	$R_m$ (1/m)	$\log(\Delta p)$	$\log(\alpha)$
$5 \times 10^4$	$3,8674 \times 10^7$	8054,5	$3,6 \times 10^{11}$	$2,0 \times 10^{10}$	4,69897	11,55582
$1 \times 10^5$	$2,3806 \times 10^7$	4430,0	$4,43 \times 10^{11}$	$2,2 \times 10^{10}$	5,00000	11,64613
$2 \times 10^5$	$1,4655 \times 10^7$	2517,0	$5,45 \times 10^{11}$	$2,5 \times 10^{10}$	5,30103	11,73644
$4 \times 10^5$	$9,0210 \times 10^6$	1359,2	$6,71 \times 10^{11}$	$2,7 \times 10^{10}$	5,60206	11,82675
$8 \times 10^5$	$5,5530 \times 10^6$	704,8	$8,26 \times 10^{11}$	$2,8 \times 10^{10}$	5,90309	11,91706

---

$$\log(\alpha_0) = 10,146 \rightarrow \alpha_0 = 1,4 \times 10^{10} \text{ m/kg}$$

$$s = 0,3$$