

USP



**Universidade de São Paulo
Escola de Engenharia de Lorena**

**LABORATÓRIO DE
ENGENHARIA QUÍMICA III
LOQ4062 – Turma 20251N3 – Engenharia Química**

EXPERIMENTOS

PROF. ANTONIO CARLOS DA SILVA



FUNDAMENTOS DOS EXPERIMENTOS

(Aulas de 22 de abril a 20 de maio)



USP

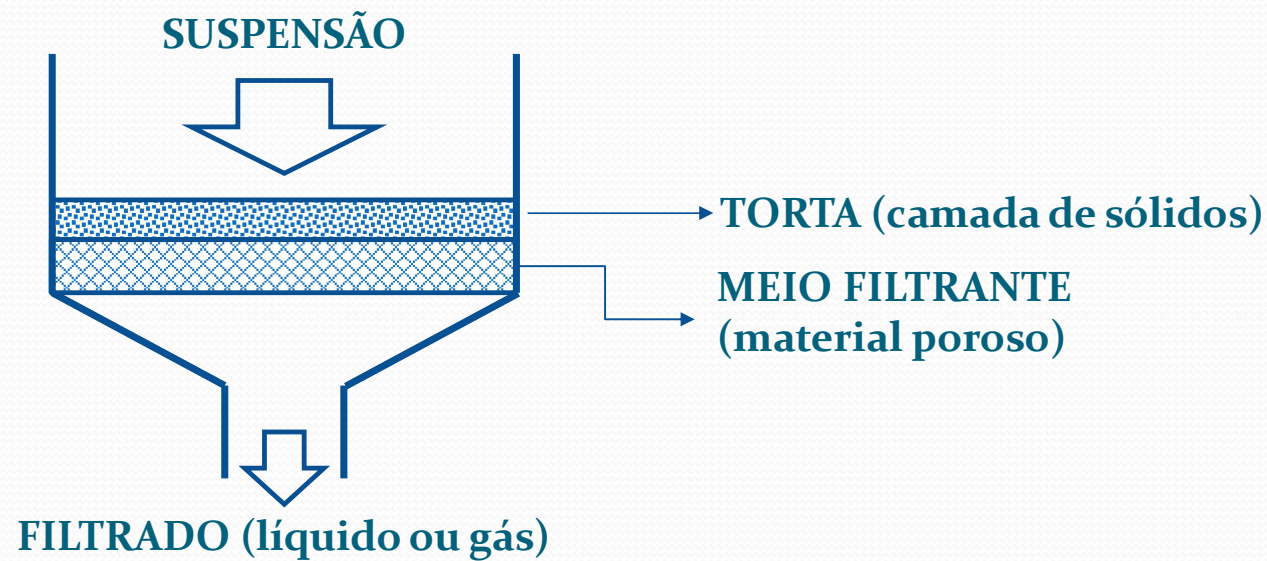


Experimento 2

Filtração

FILTRAÇÃO

- Separação de partículas sólidas contidas em um fluido, passando-o por um meio filtrante, sobre o qual se depositam os sólidos.



APLICAÇÕES DE FILTRAÇÃO

- Melhoria da aparência de soluções (aspecto mais limpo)
- Remoção de partículas que possam ser nocivas
- Recuperação de material sólido presente em suspensão
- Purificação do filtrado

MEIO FILTRANTE

- É um material permeável constituído de metal (aço, alumínio, ligas metálicas, etc), fibras vegetais (algodão, celulose) ou animais (lã) ou sintéticas (nylon, dracon), areia.
- O meio de filtração deve cumprir os seguintes requisitos:
 - Reter os sólidos, dando limpeza razoável ao filtrado (porosidade adequada)
 - Não deve ser obstruído facilmente
 - Deve ter resistência química e física para suportar as condições de processo
 - Deve permitir a descarga limpa e completa da torta formada
 - Não deve ser caro

MEIO FILTRANTE

- Meio filtrante mais comum: lona ou tecido.
- Para líquidos corrosivos, usam-se outros meios como lã, telas metálicas como inox e monel (Ni e Cr), lã de vidro, fibras sintéticas como nylon, polipropileno, dacron.
- Também são utilizados algodão, celulose, lã, papel, outras fibras naturais.
- Telas metálicas e fibras sintéticas lisas são menos eficientes para reter partículas finas do que as fibras naturais.
- A torta colabora com a filtração, colaborando na retenção de partículas.

AUXILIARES DE FILTRAÇÃO

- São materiais de revestimento, destinados a auxiliar na remoção de sólidos muito finos ou gelatinosos.
- Têm a função de aumentar a porosidade da torta.
- Materiais empregados: terra de diatomácea (diatomita), asbesto, celulose de madeira.

AUXILIARES DE FILTRAÇÃO

- Podem ser usados de duas maneiras:
 - Adicionando-o à suspensão, antes da filtração: o material se depositará sobre o meio de filtração, formando uma camada porosa que retém os sólidos; o meio auxiliar pode ser separado por dissolução dos sólidos ou por queima.

AUXILIARES DE FILTRAÇÃO

- Podem ser usados de duas maneiras:
 - Antes de iniciar-se a filtração, adiciona-se uma camada de auxiliar sobre o meio de filtração; nos filtros contínuos utiliza-se camada grossa e nos filtros descontínuos, utiliza-se camada fina.

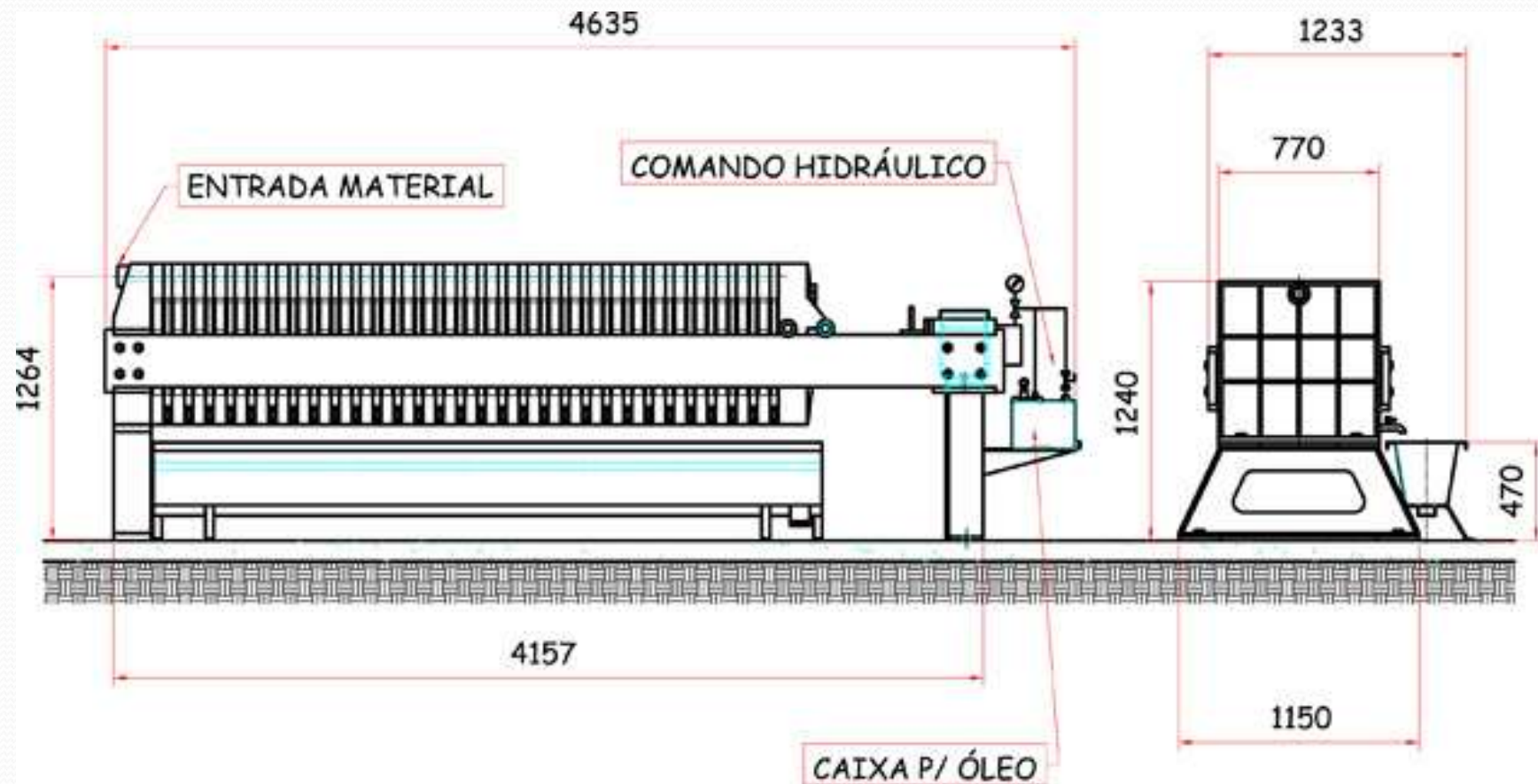
FILTRAÇÃO INDUSTRIAL

- A passagem do filtrado através do meio poroso (meio filtrante, meio auxiliar, torta) ocorre com uma diferença de pressão:
 - Filtros a vácuo: suspensão na pressão atmosférica e filtrado recolhido sob vácuo
 - Filtros de pressão: suspensão pressurizada e filtrado recolhido na pressão atmosférica
 - Filtros de gravidade: forma-se uma camada de suspensão sobre o meio poroso e a pressão hidrostática é exercida sobre o meio.
 - Força centrífuga nos filtros centrífugos.

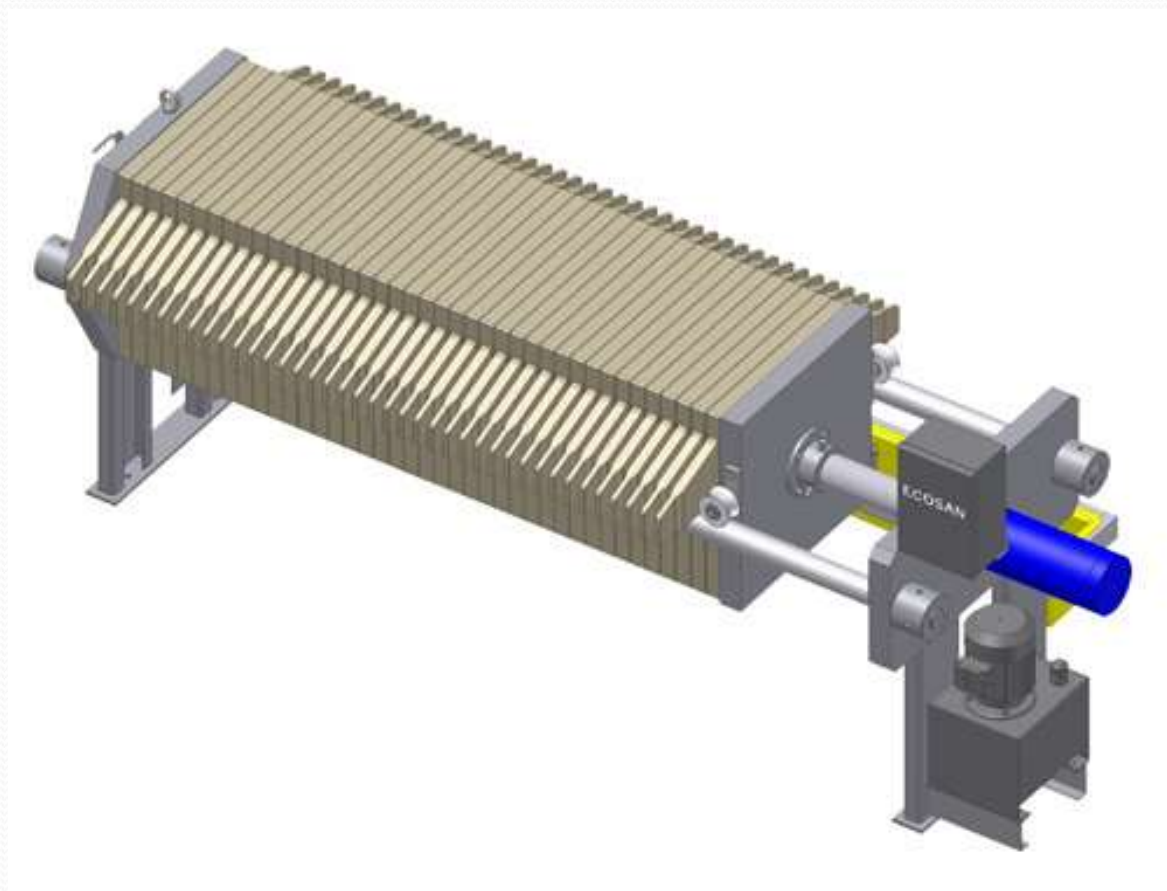
FILTRAÇÃO INDUSTRIAL

- **Perda de carga: passagem do fluido na porosidade ocorre com perda de carga, daí a necessidade de Δp .**

FILTRO PRENSA



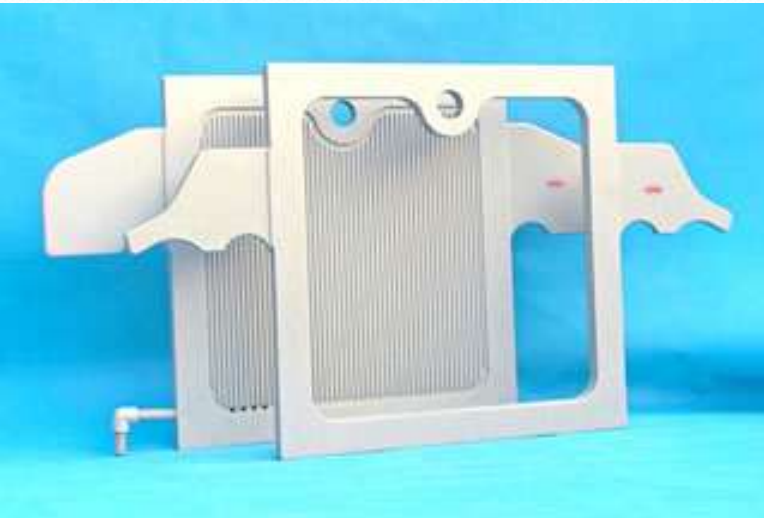
FILTRO PRENSA



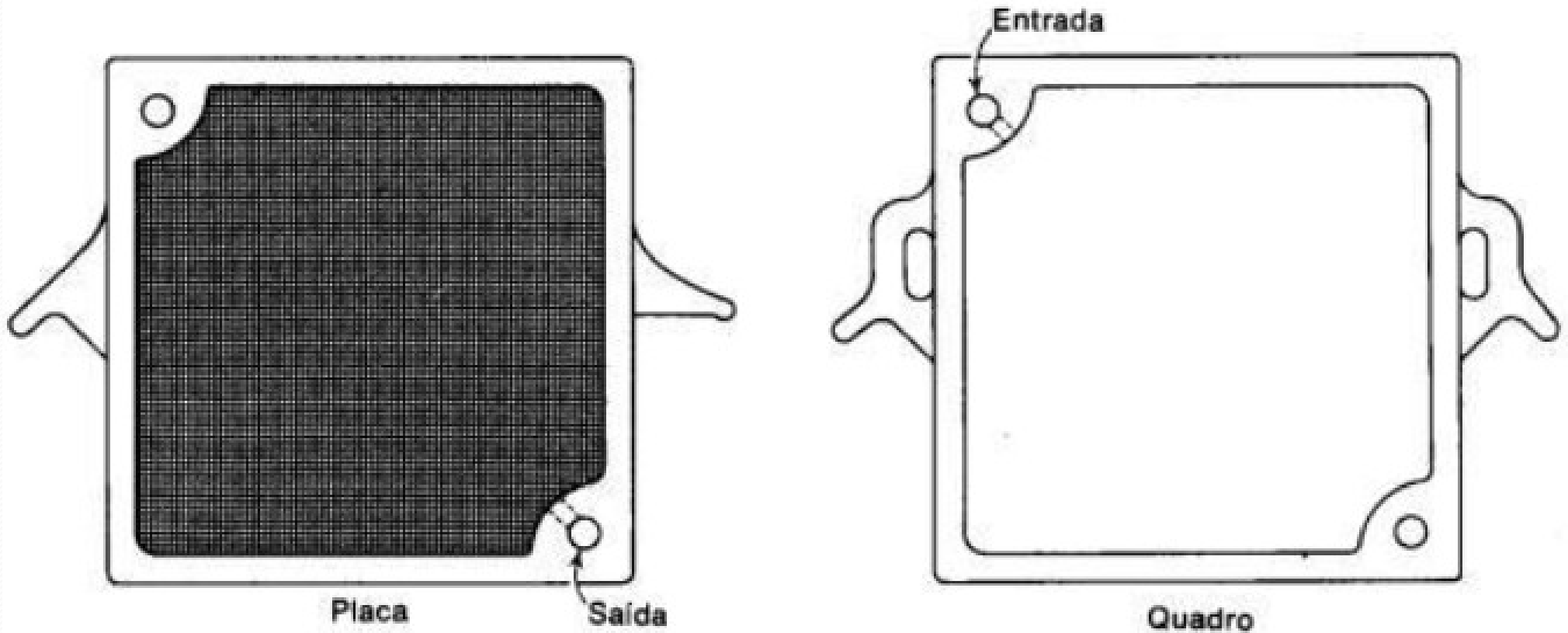
FILTRO PRENSA



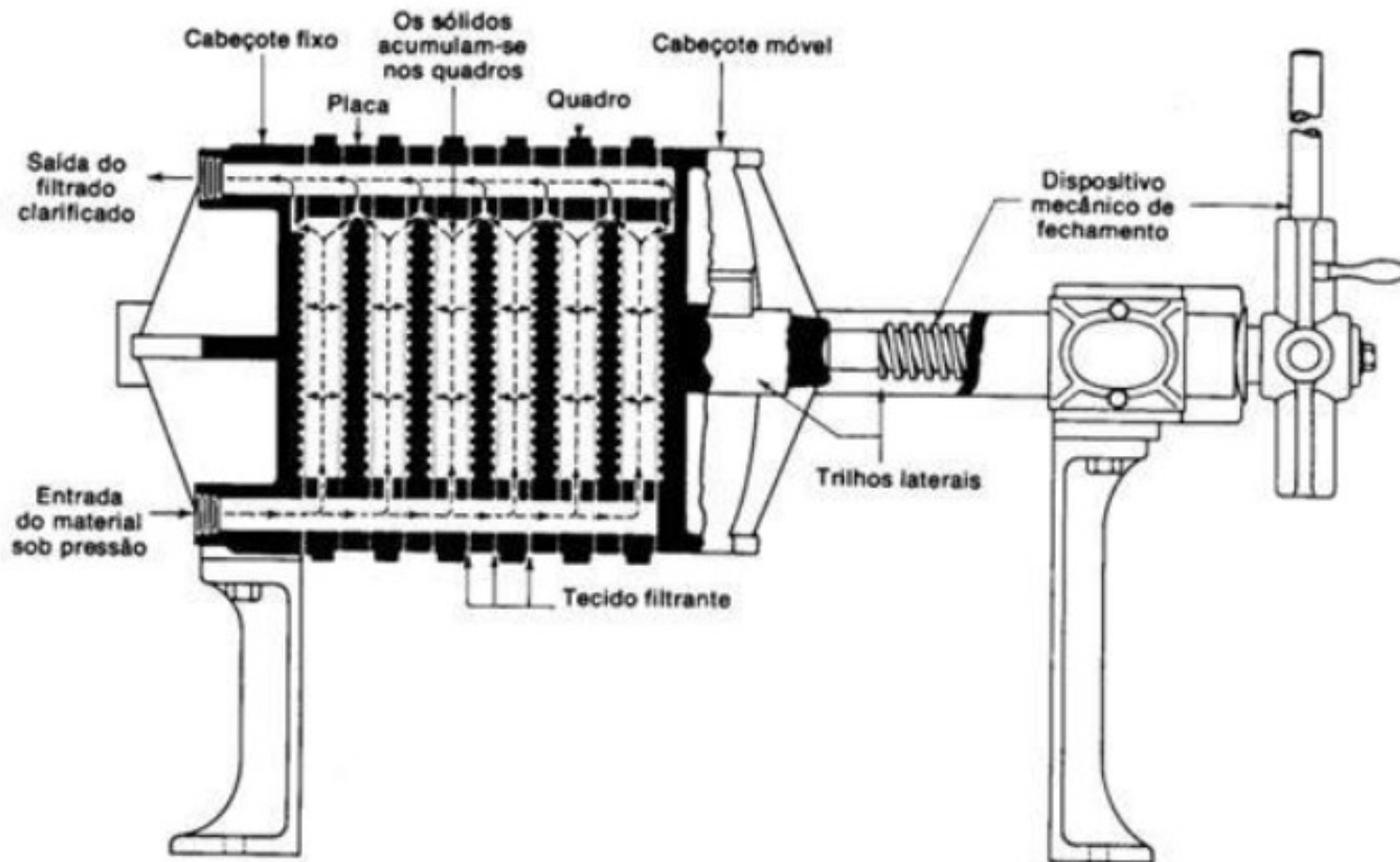
FILTRO PRENSA



FILTRO PRENSA



FILTRO PRENSA



FILTRO PRENSA



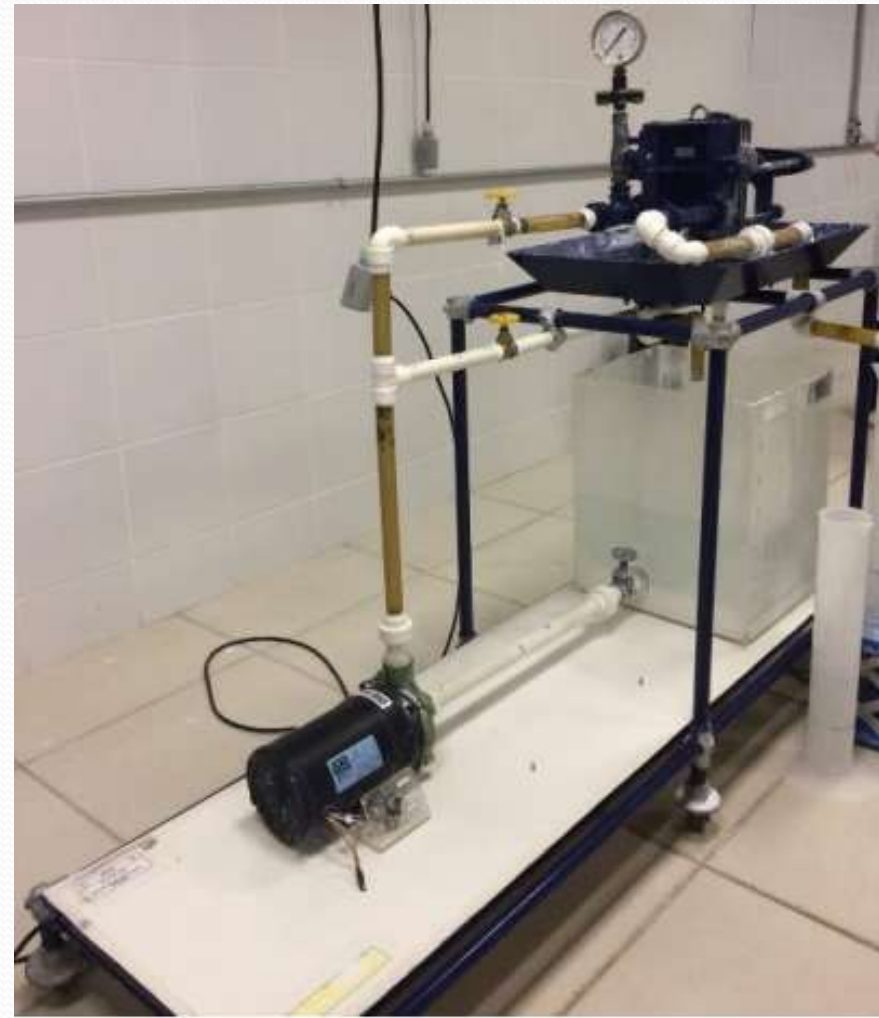
FILTRO PRENSA





FILTRO DO LABORATÓRIO DE ENGENHARIA

FILTRO PRENSA



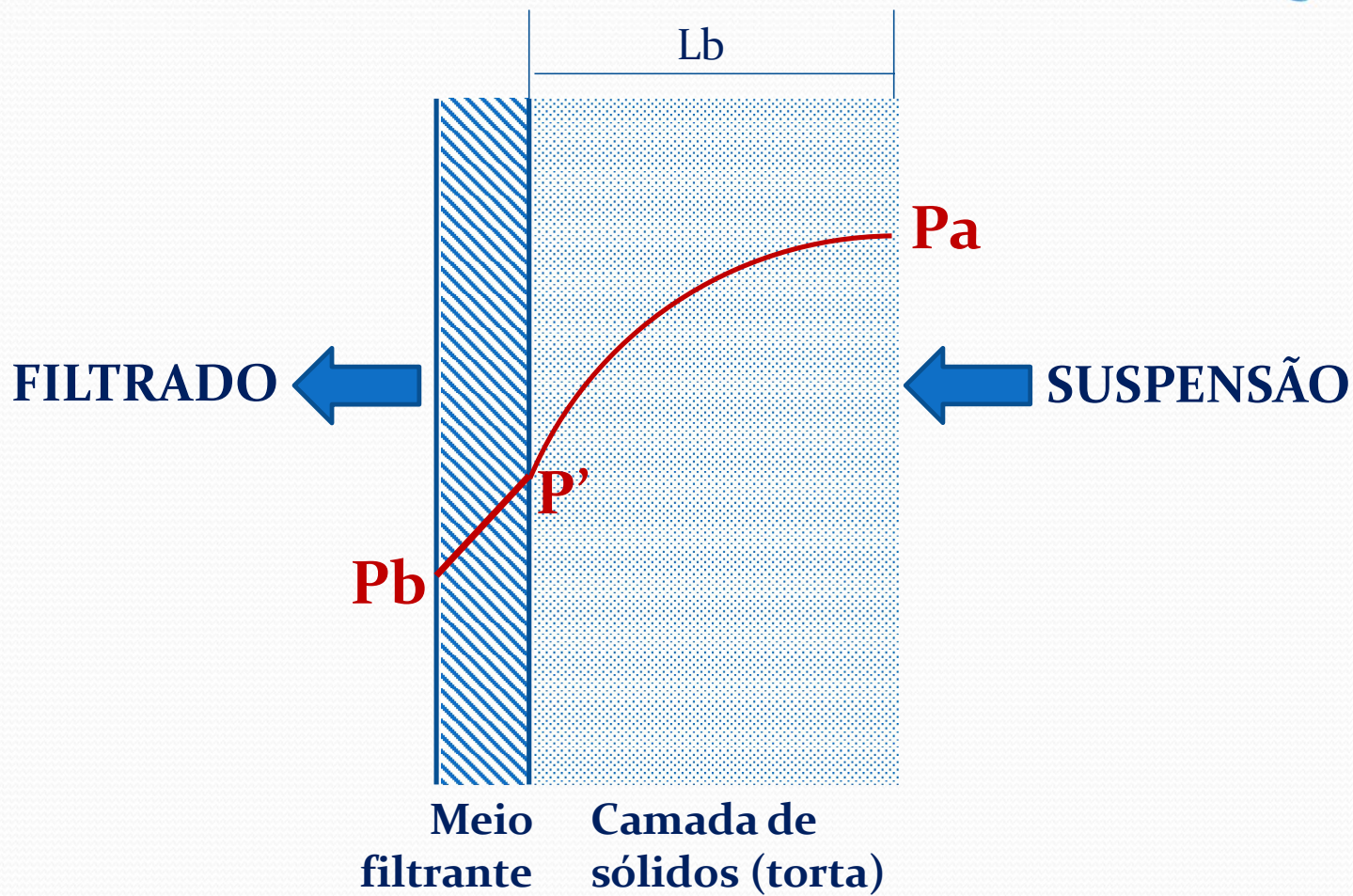
FILTRO PRENSA



FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO

- Do ponto de vista da Mecânica dos Fluidos um filtro é um sistema de fluxo.
- Há uma diferença de pressão aplicada entre a entrada da suspensão e a saída do filtrado que força o líquido a escoar através do meio de filtração e da camada de sólidos (Torta)

FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO



L_b ... Espessura da torta

P_a ... Pressão da suspensão

P_b ... Pressão do filtrado

P' ... Pressão exercida pelo líquido na interface torta/meio filtrante

FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO

O filtrado passa por três tipos de resistências em série:

- a) Resistência ao escoamento nos tubos que conduzem a suspensão até o filtro e o filtrado a partir deste;**
- b) Resistência da torta; e**
- c) Resistência do meio filtrante.**

FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO

A resistência dos tubos é muito menor que as outras duas, podendo ser desprezada.

Assim, devido às resistências do bolo e do meio filtrante, que provocam perdas de carga, a pressão se reduz de P_a a P_b .

FUNDAMENTOS DA FILTRAÇÃO

Tem-se que: $\Delta P = P_b - P_a$

$$-\Delta P = P_a - P_b = (P_a - P') + (P' - P_b)$$

$$-\Delta P = -\Delta P_T - \Delta P_m$$

$-\Delta P$... Queda de pressão total

$-\Delta P_T$... Queda de pressão na torta

$-\Delta P_m$... Queda de pressão no meio de filtração

OPERAÇÃO DE FILTROS

Formas de operação de filtros:

➤ Filtração contínua

➤ Filtração descontínua:

- Pressão constante: se DP é constante, a velocidade de filtração é máxima no início e diminui com o tempo
- Velocidade constante: a pressão de entrada aumenta com o tempo

RESISTÊNCIAS À FILTRAÇÃO

Resistência da Torta (ou Bolo):

$$\alpha = \frac{-\Delta P_T \cdot g_c \cdot A}{\mu \cdot u \cdot m_c}$$

Resistência do meio de filtração:

$$R_m = \frac{-\Delta P_m \cdot g_c}{\mu \cdot u}$$

A ... Área do meio de filtração

μ ... Viscosidade do filtrado

u ... Velocidade linear do filtrado

m_c ... Massa de sólidos na torta

g_c ... Fator de conversão massa-força

RESISTÊNCIAS À FILTRAÇÃO

Valores da constante g_c :

$$g_c = 1 \frac{(kg \cdot m)}{N \cdot s^2} \quad \therefore \quad \textit{Sistema Internacional}$$

$$g_c = 9,8067 \frac{kg \cdot m}{kgf \cdot s^2} \quad \therefore \quad \textit{Sistema Técnico}$$

$$g_c = 32,2 \frac{lb \cdot ft}{lbf \cdot s^2} \quad \therefore \quad \textit{Sistema Inglês}$$

RESISTÊNCIAS À FILTRAÇÃO

Relações empíricas para a resistência do bolo

$$\alpha = \alpha_o \cdot (-\Delta P)^s$$

$$\alpha = \alpha'_o \cdot [1 + \beta \cdot (-\Delta P)^{s'}]$$

$\alpha_o, \alpha'_o, \beta, s, s'$... Constantes empíricas

RESISTÊNCIAS À FILTRAÇÃO

Concentrações usuais:

- Concentração da suspensão:

$$C_s = \frac{m}{V_s} \quad \dots \quad \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{volume de solução}}$$

- Concentração em relação ao filtrado:

$$C = \frac{m}{V_f} \quad \dots \quad \frac{\text{massa de sólidos}}{\text{volume de filtrado}}$$

RESISTÊNCIAS À FILTRAÇÃO

Uma vez que o volume de filtrado é menor que o volume da suspensão (os sólidos em suspensão se separam do filtrado retendo ainda parte do filtrado nos seus poros) C é ligeiramente maior que C_s .

$$C = \frac{C_s}{1 - \left[\left(\frac{m_u}{m_c} \right) - 1 \right] \cdot \frac{C_s}{\rho}}$$

m_u ... massa da torta (bolo) úmido

m_c ... massa da torta (bolo) seca

ρ ... massa específica do filtrado



FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

Equação da variação de volume com tempo:

$$t = \frac{\mu}{g_c \cdot (-\Delta P)} \cdot \left[\frac{C \cdot \alpha}{2} \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^2 + R_m \cdot \frac{V}{A} \right]$$

t ... Tempo de operação do filtro (s)

V ... Volume de filtrado recolhido no tempo t (m³/s)

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

$$t = \frac{\mu}{g_c \cdot (-\Delta P)} \cdot \left[\frac{C \cdot \alpha}{2} \cdot \left(\frac{V}{A} \right)^2 + R_m \cdot \frac{V}{A} \right]$$

Derivando t em relação a V: $\frac{dt}{dV} = \frac{C \cdot \mu \cdot \alpha}{g_c \cdot (-\Delta P) \cdot A^2} \cdot V + \frac{\mu \cdot R_m}{g_c \cdot A \cdot (-\Delta P)}$

Ou ainda: $\frac{dt}{dV} = K \cdot V + B$

Com: $K = \frac{C \cdot \mu \cdot \alpha}{g_c \cdot (-\Delta P) \cdot A^2}$ e $B = \frac{\mu \cdot R_m}{g_c \cdot A \cdot (-\Delta P)}$

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

$$\frac{dt}{dV} = K \cdot V + B$$

Se forem realizadas diversas medições sucessivas de V a vários valores diferentes de t, pode-se calcular $\Delta t/\Delta V$ para cada duas medidas sucessivas.

Construindo-se um diagrama de $\Delta t/\Delta V$ em função de V (considerando V como a média de duas medidas consecutivas) obtém-se uma reta podendo-se calcular K e B.

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

EXEMPLO

Em ensaios de filtração realizados em laboratório a pressão constante, com uma suspensão aquosa de carbonato de cálcio, foram obtidos os dados da tabela apresentada. A área do filtro era 440 cm^2 , a massa de sólidos por unidade de volume de filtrado era $23,5 \text{ g/L}$ e a viscosidade do filtrado era $0,866 \text{ cP}$ ou $0,866 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$). Calcular α e R_m em função da queda de pressão.

FILTRAÇÃO A PRESSÃO CONSTANTE

Experimento	1	2	3	4	5
$-\Delta P$ (kgf/cm ²)	0,47	1,14	1,98	2,55	3,45
Volume filtrado V (L)	Tempo de filtração (s)				
0,5	17,3	6,8	6,3	5,0	4,4
1,0	41,3	19,0	4,0	11,5	9,5
1,5	72,0	34,6	24,2	19,8	16,3
2,0	108,3	53,4	37,0	30,1	24,6
2,5	152,1	76,0	51,7	42,5	34,7
3,0	201,7	102,0	69,0	56,8	46,1
3,5		131,2	88,8	73,0	59,0
4,0		163,0	110,0	91,2	73,6
4,5			134,0	111,0	89,4
5,0			160,0	133,0	107,3
5,5				156,8	
6,0				182,5	

USP



Experimento 3

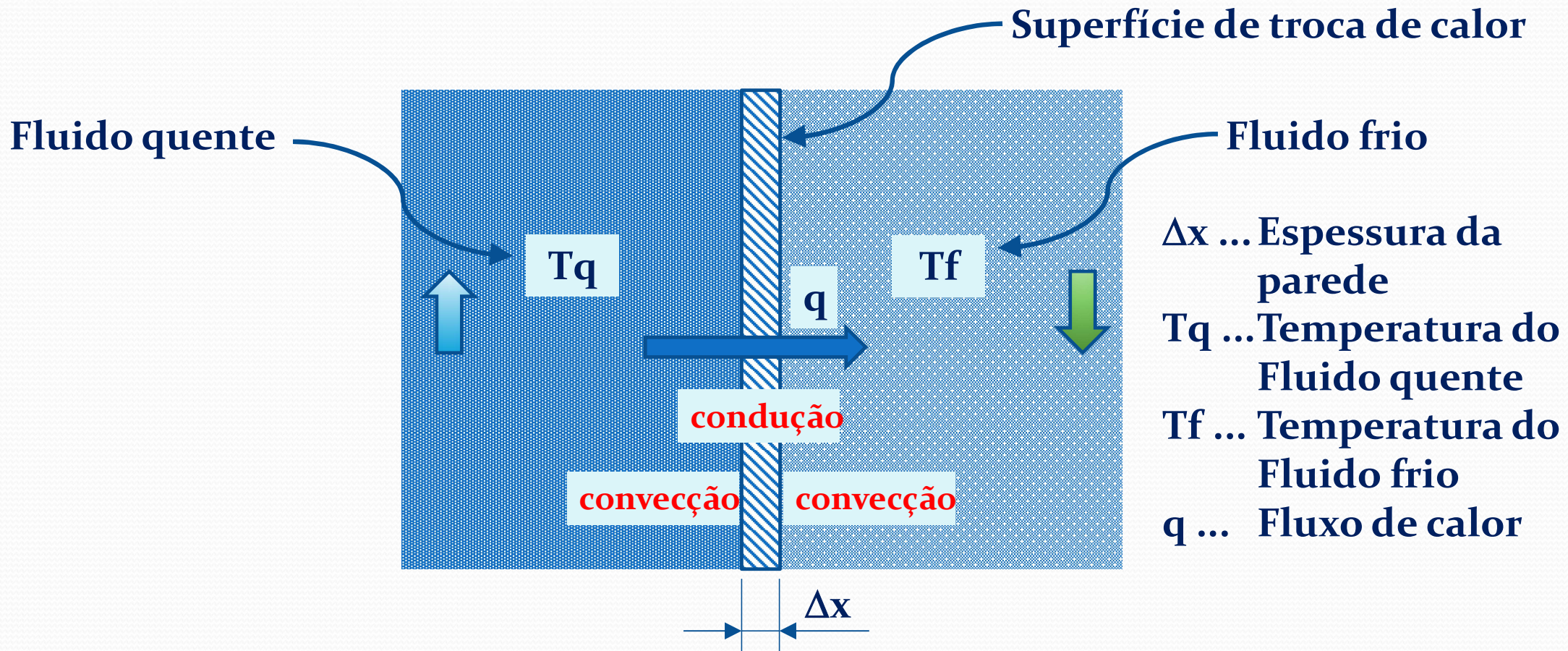
Trocadores de Calor

TROCADORES DE CALOR

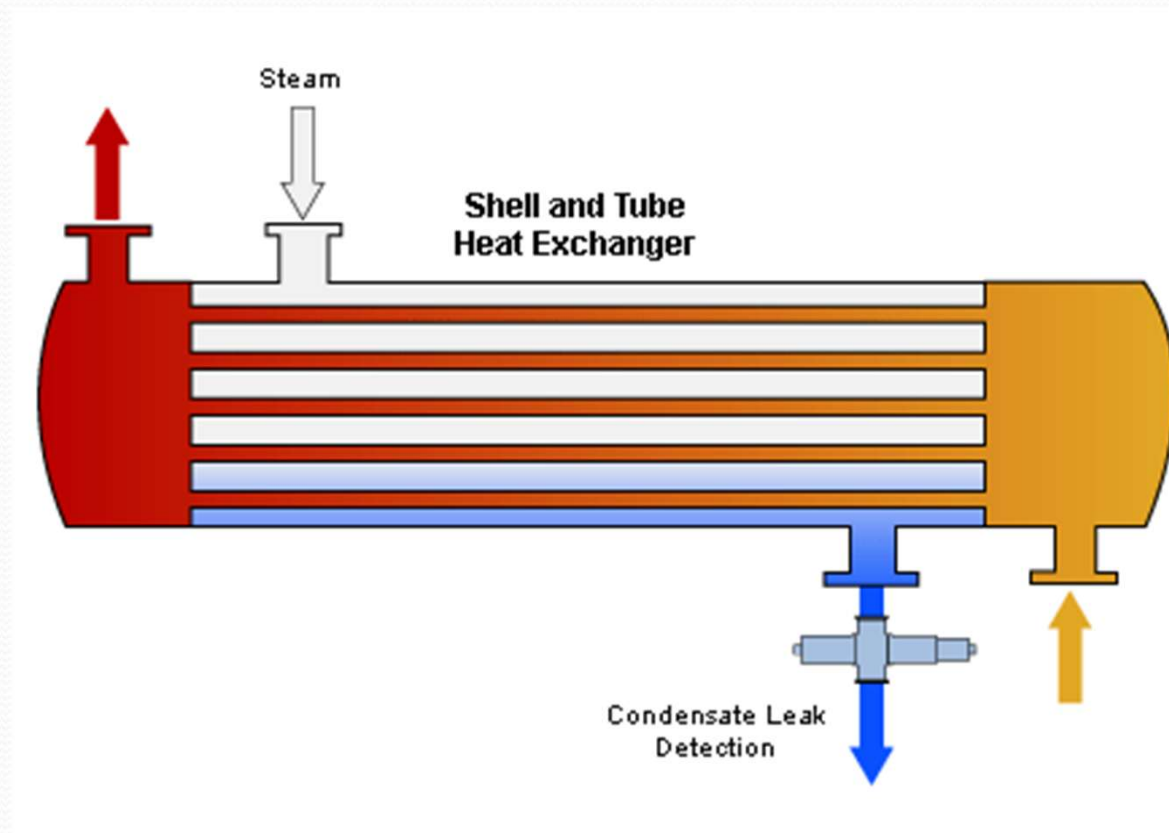
Definição:

Trocadores de calor são equipamentos empregados para implementar a troca de calor entre dois fluidos ou mais sujeitos a diferentes temperaturas.

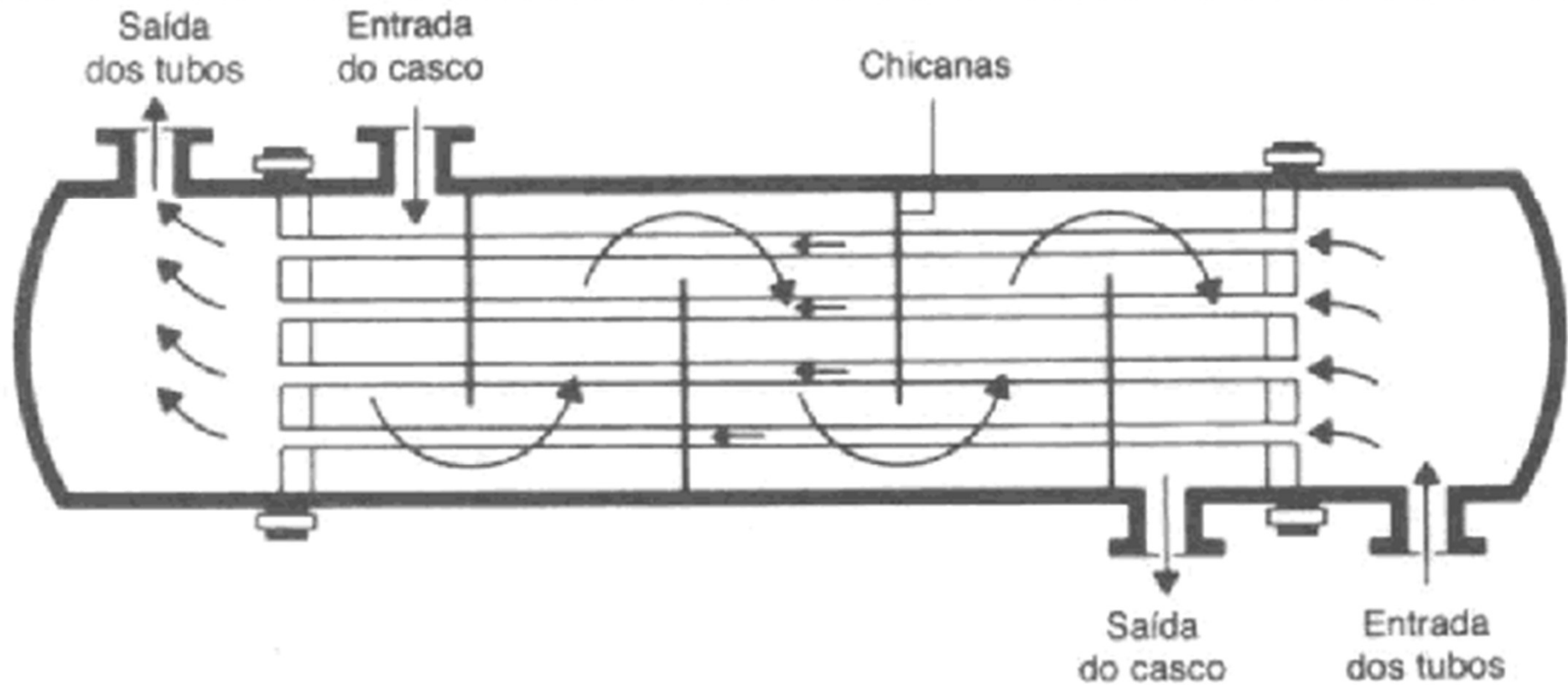
TROCADORES DE CALOR

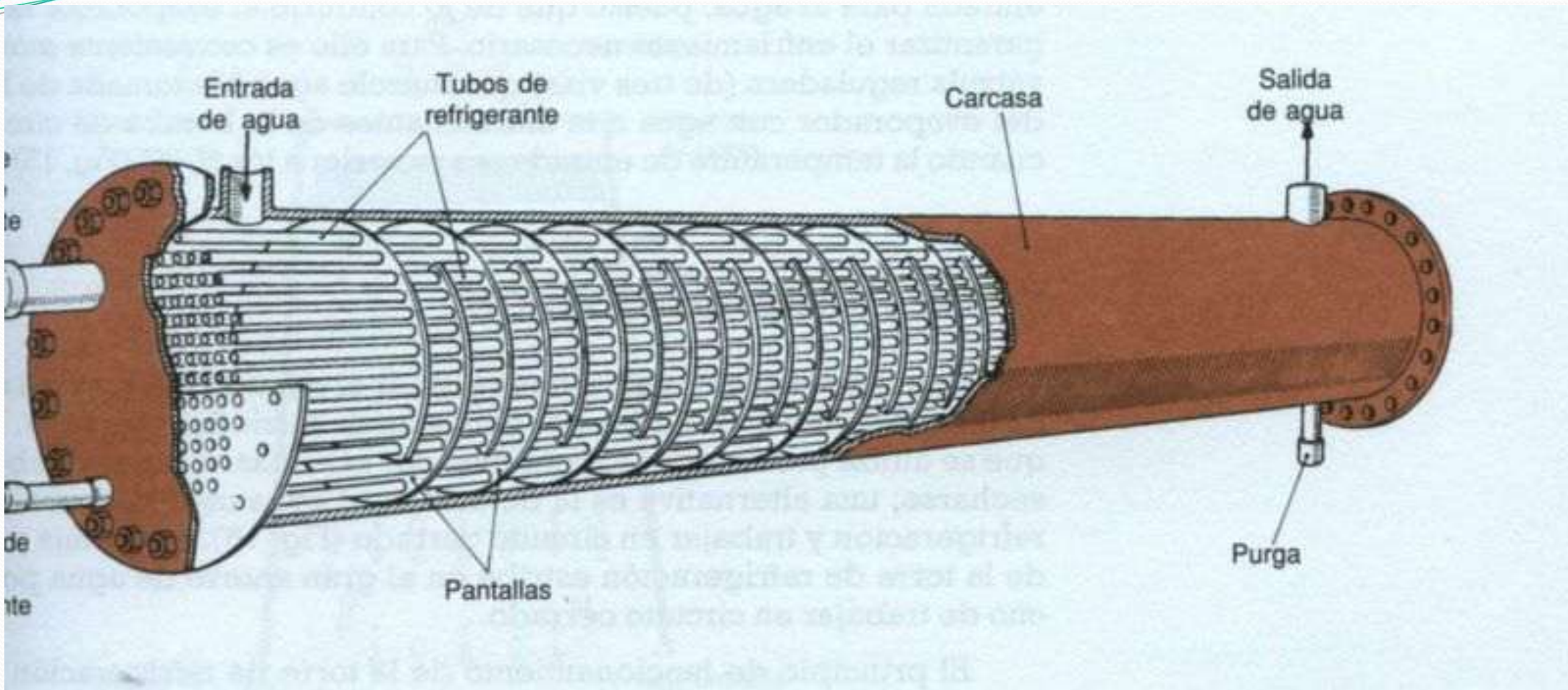


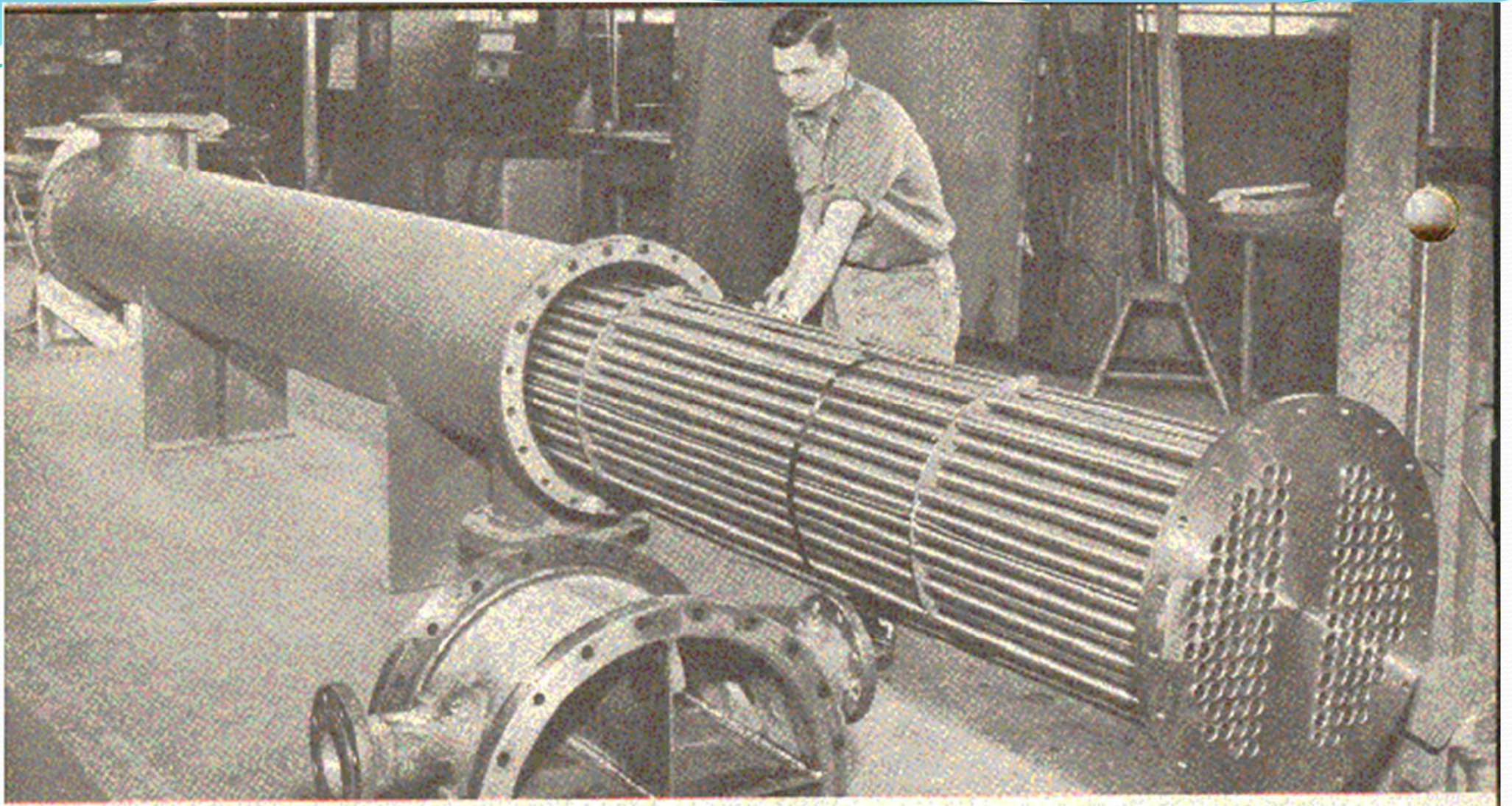
TROCADOR DE CASCO E TUBOS

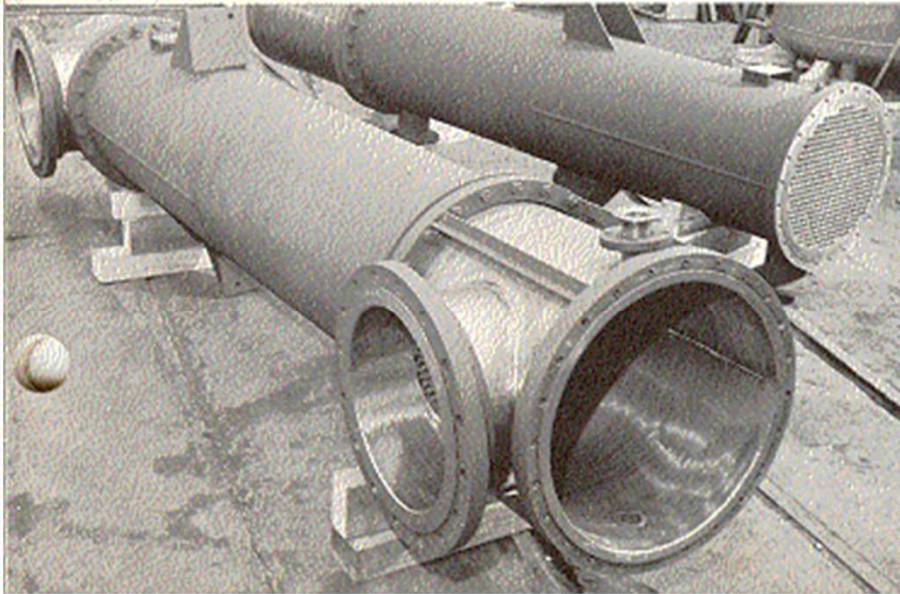
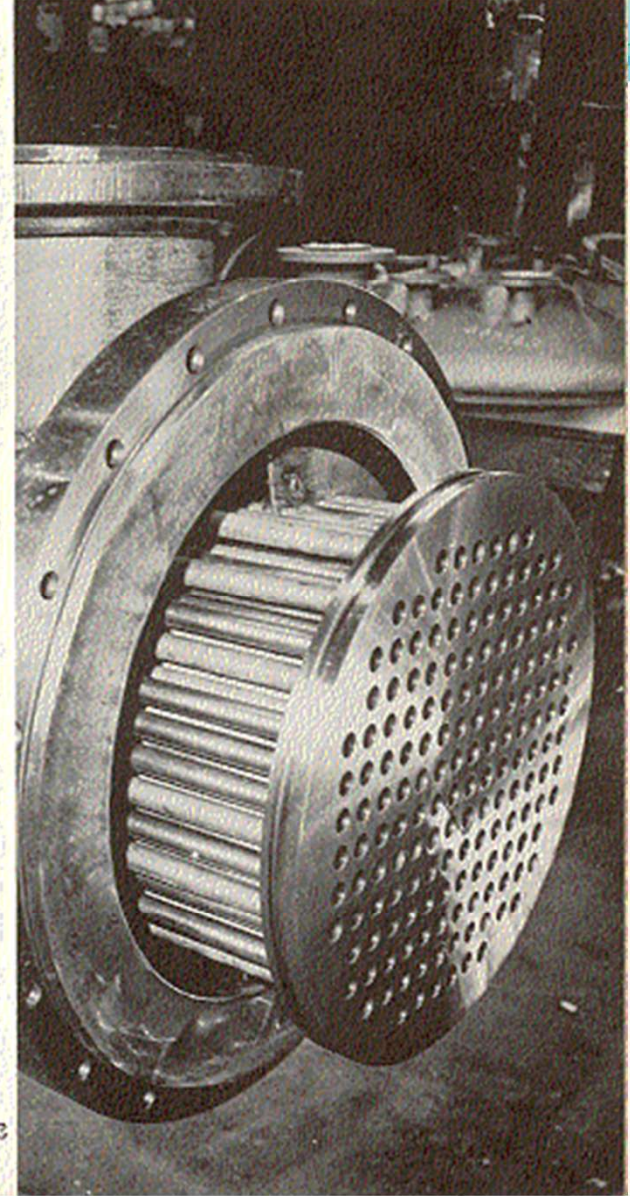
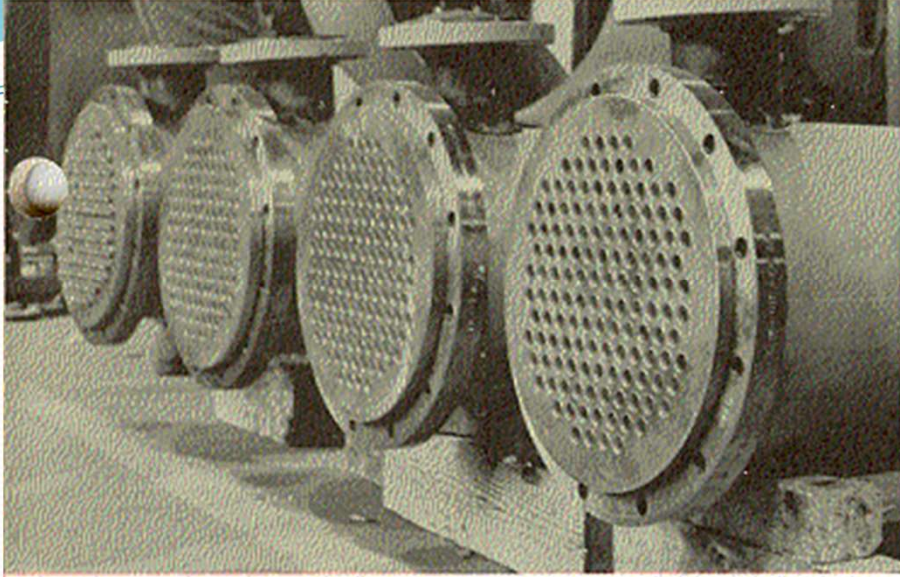


TROCADOR DE CASCO E TUBOS







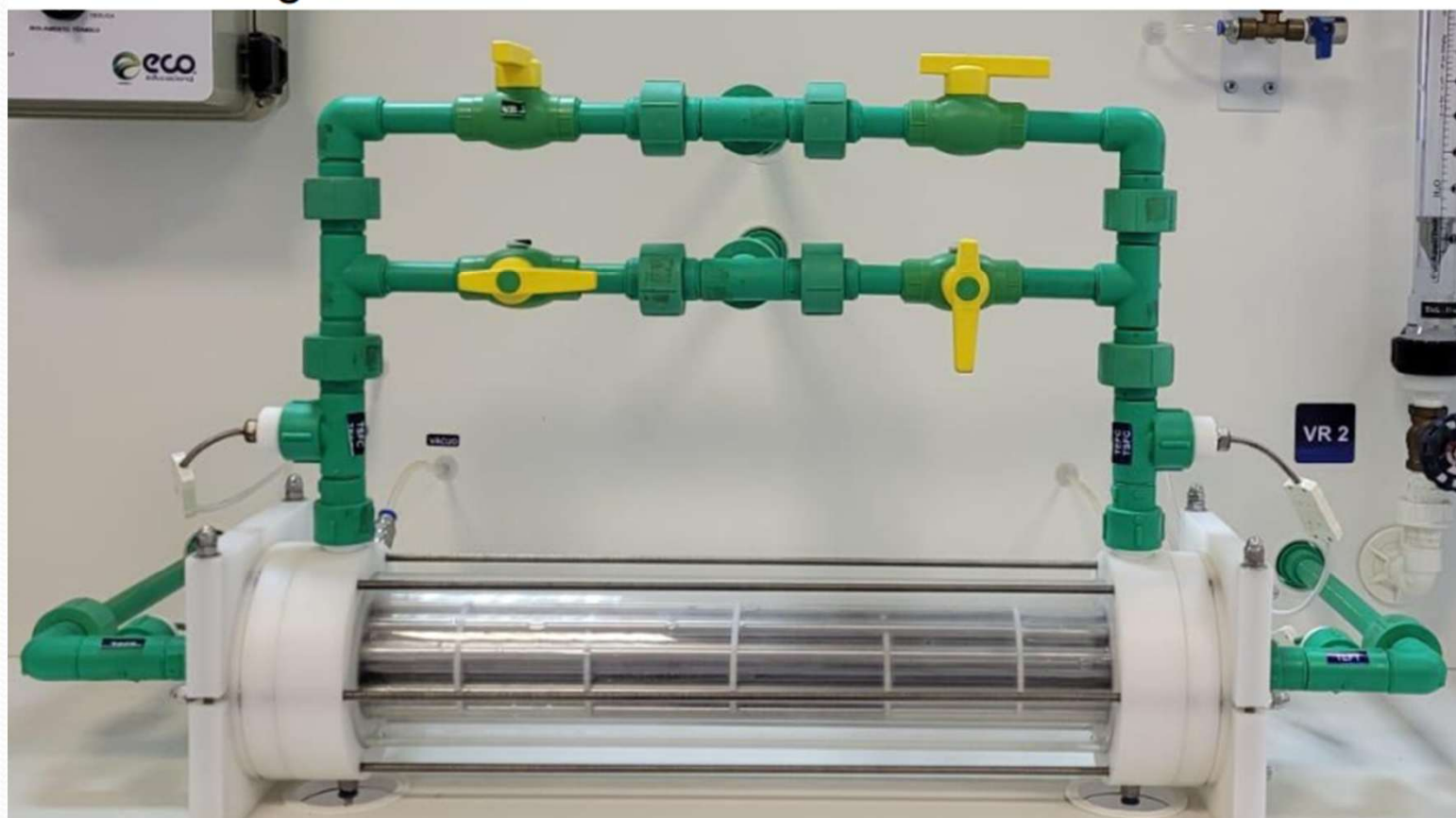




TROCADOR DE CALOR DO LABORATÓRIO

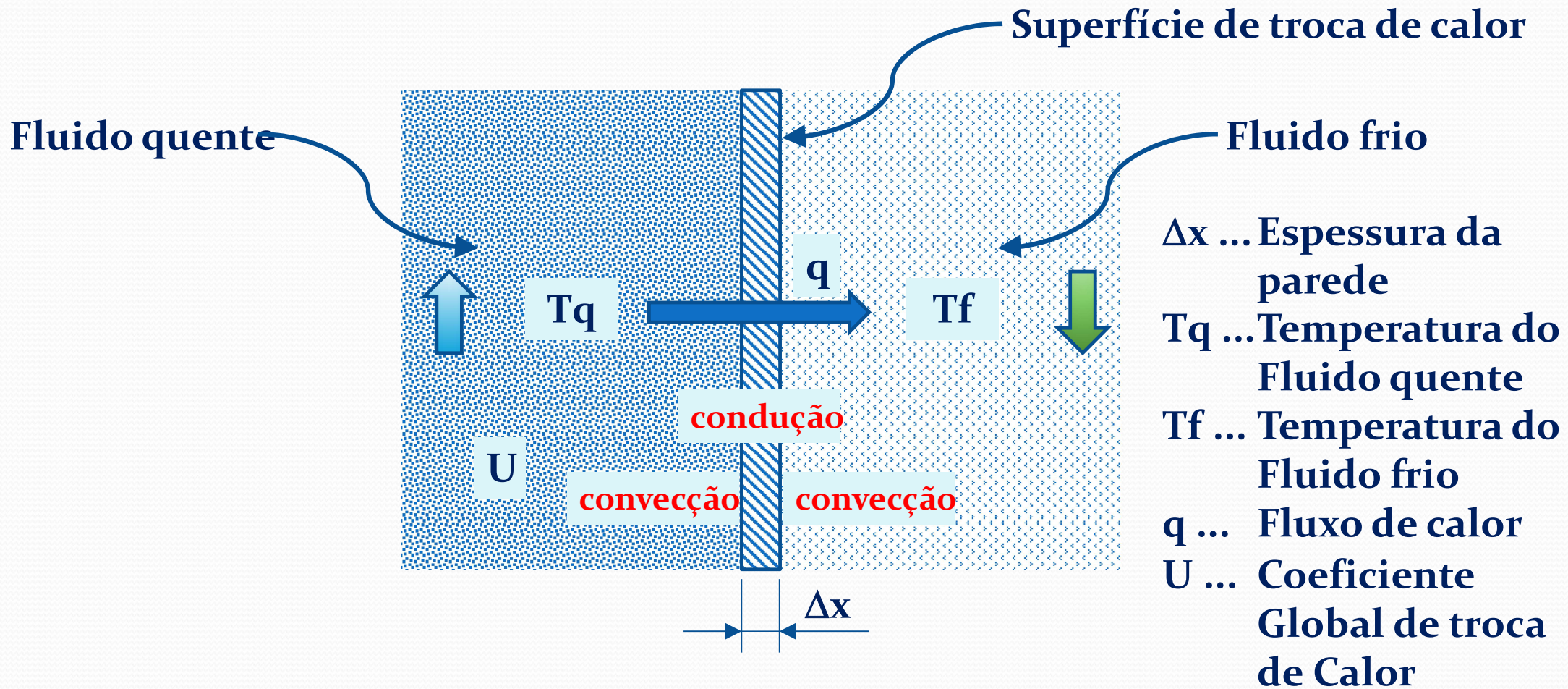


TROCADOR DE CALOR DO LABORATÓRIO



CÁLCULO DE TROCADORES DE CALOR

COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA DE CALOR



CÁLCULO DE TROCADORES DE CALOR

- Coeficiente Global de Transferência de Calor

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x \cdot A_i}{k \cdot A_m} + \frac{A_i}{h_e \cdot A_e}$$

- Para uma seção circular:

$$\frac{1}{U_i} = \frac{1}{h_i} + \frac{\Delta x \cdot D_i}{k \cdot D_m} + \frac{D_i}{h_e \cdot D_e}$$

MÉTODO DTML

- Diferença de Temperatura Média Logarítmica:

$$\Delta T_{ML} = \left[\frac{(\Delta T_2 - \Delta T_1)}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \right]$$

