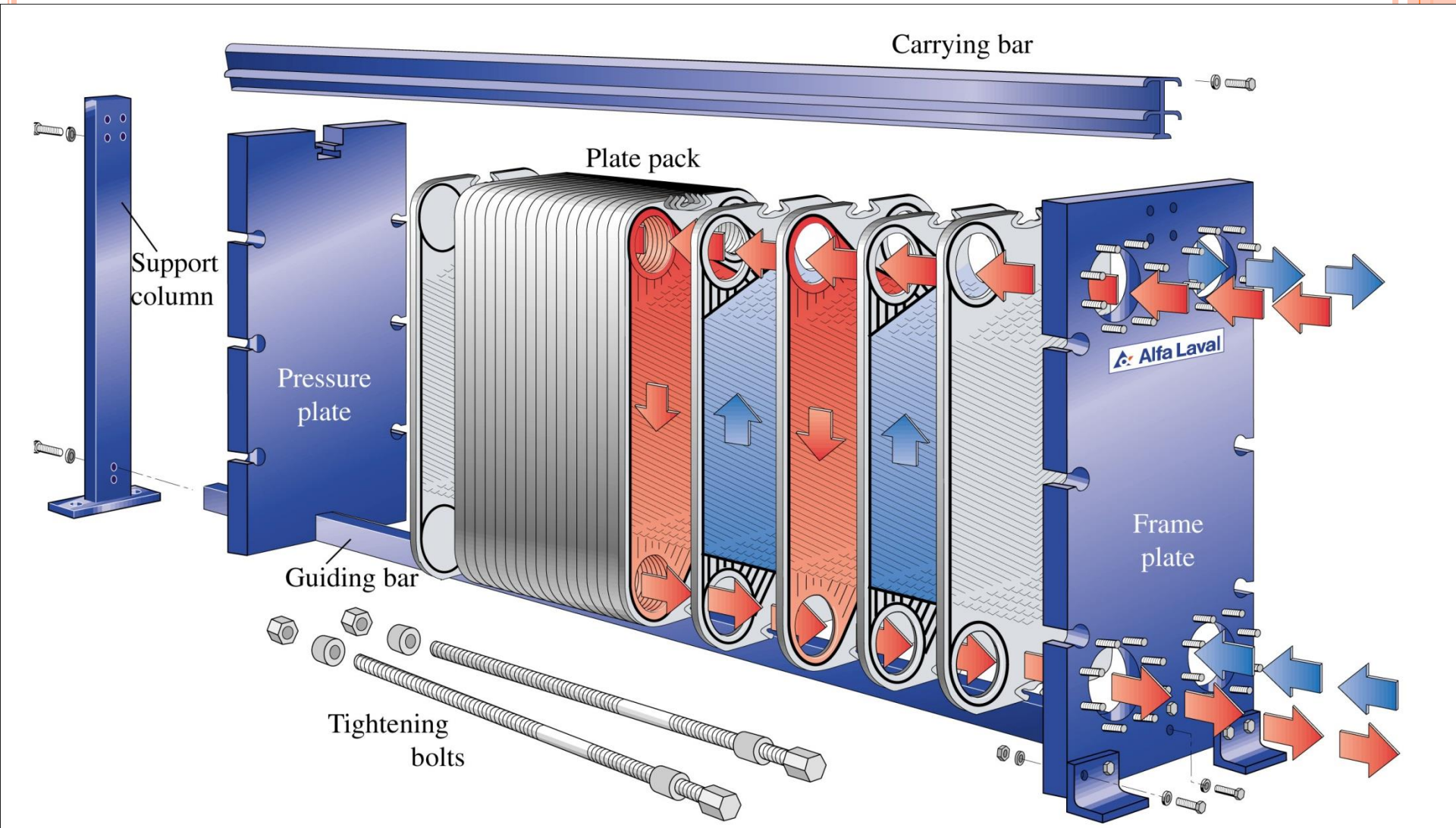
Operações Unitárias II

Aula 4:
- Dimensionamento de Trocadores de calor a placas
- Análise de Trocadores: MLDT e NUT

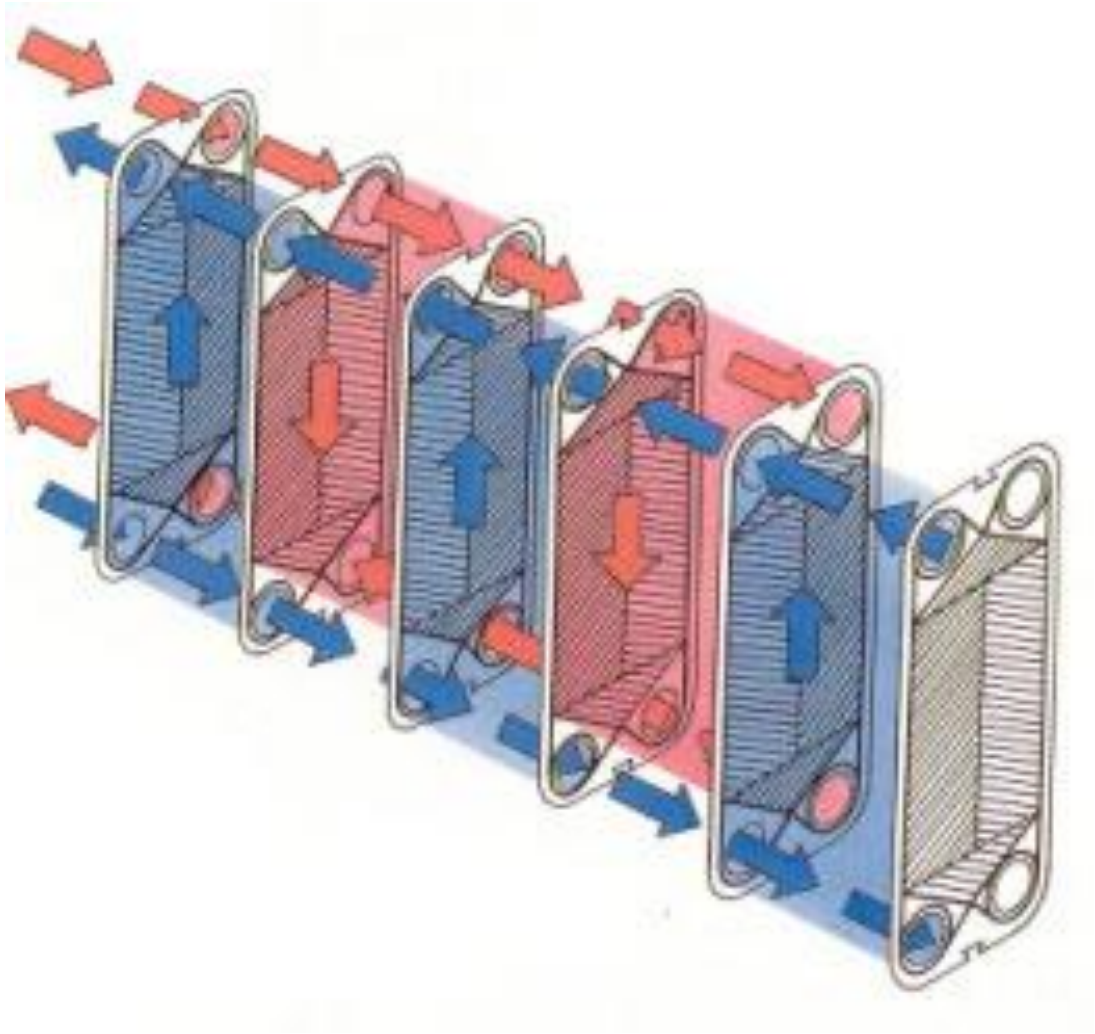
Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

Trocador de Calor a Placas



http://rpaulsingh.com/animations/plateheatexch.html

Trocador de Calor a Placas



Trocador a placas

<u>Arranjo de passes:</u> lado quente → 2x2 (dois passes no trocador em dois canais)
lado frio → 4x1 (quatro passes no trocador 1 canal)

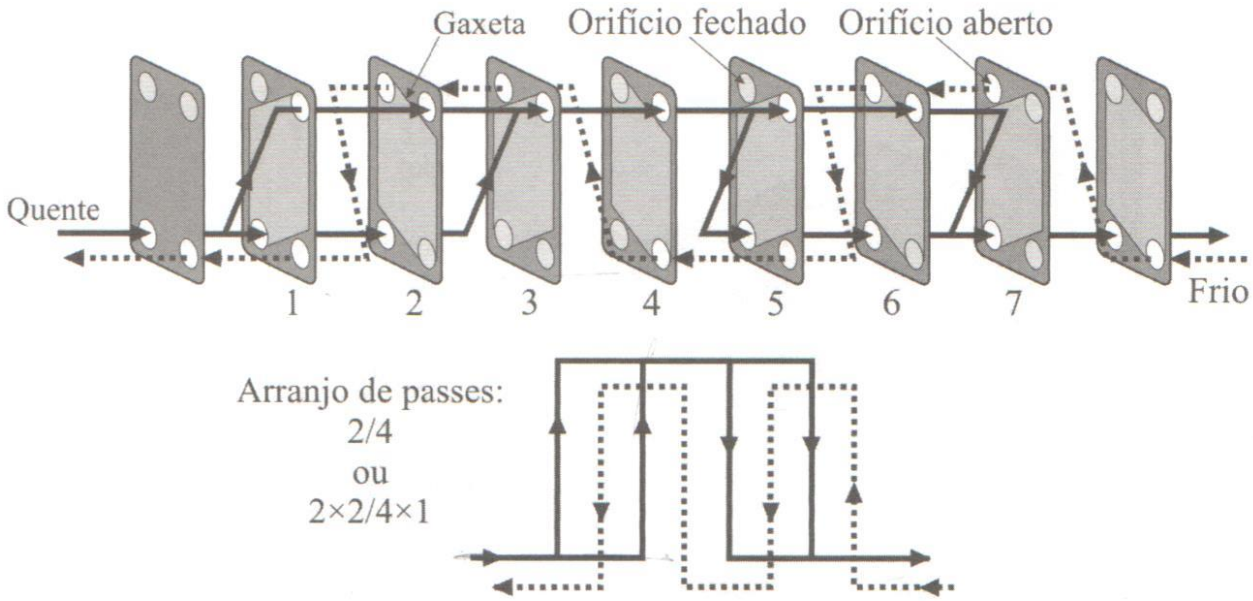
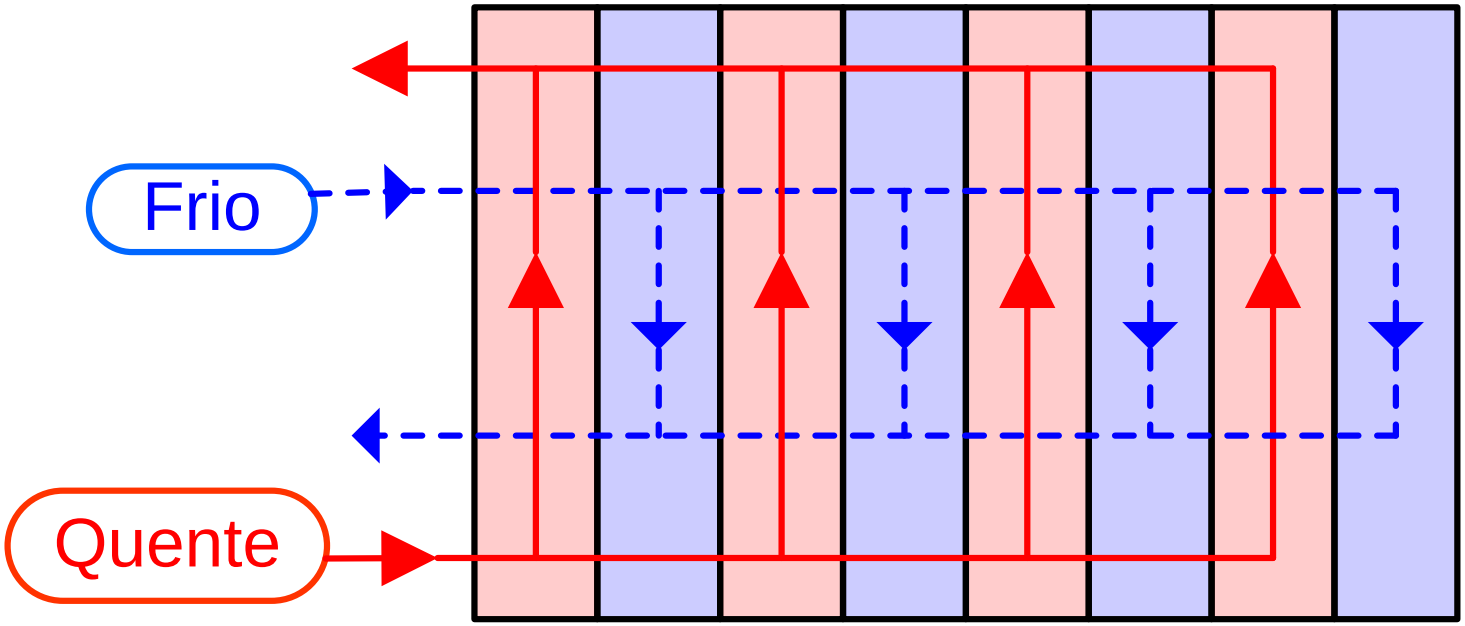


Figura 10.9 Uma possibilidade de arranjo de passes para um trocador de calor de placas com nove placas e, consequentemente, oito canais de escoamento.

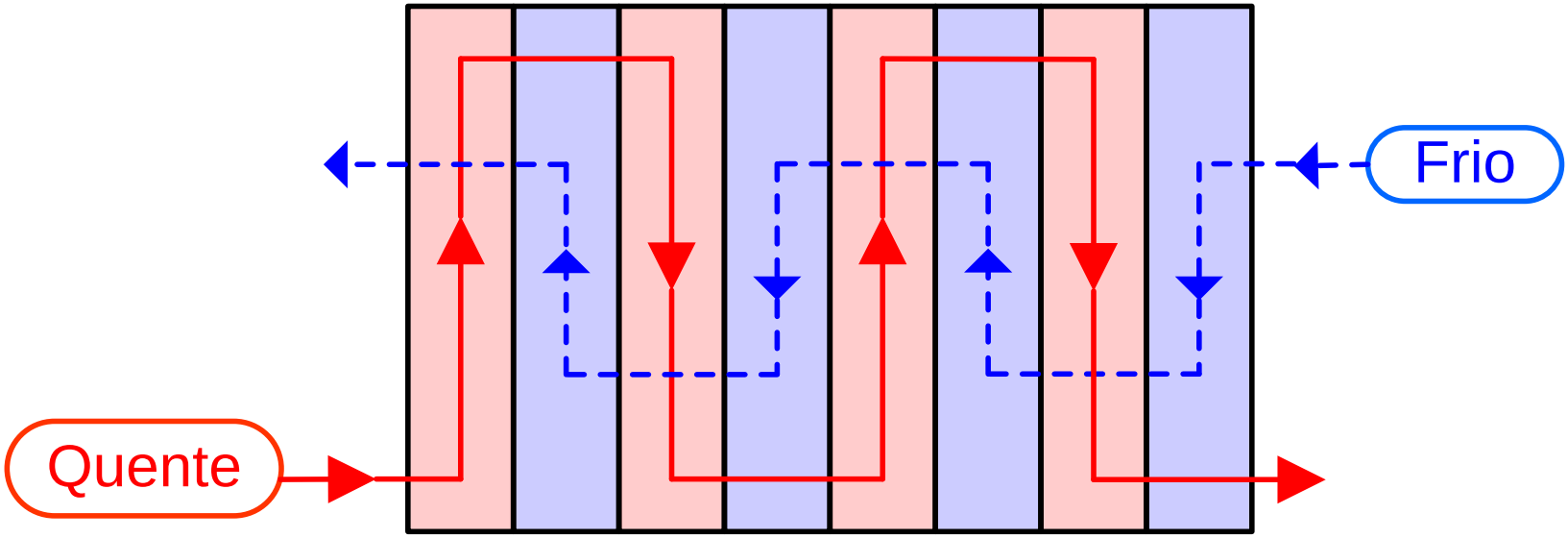
<u>Gaxetas</u>: juntas em elastômero responsáveis pela vedação entre os meios de troca e a atmosfera que equipam as placas.

Trocador de Calor a Placas



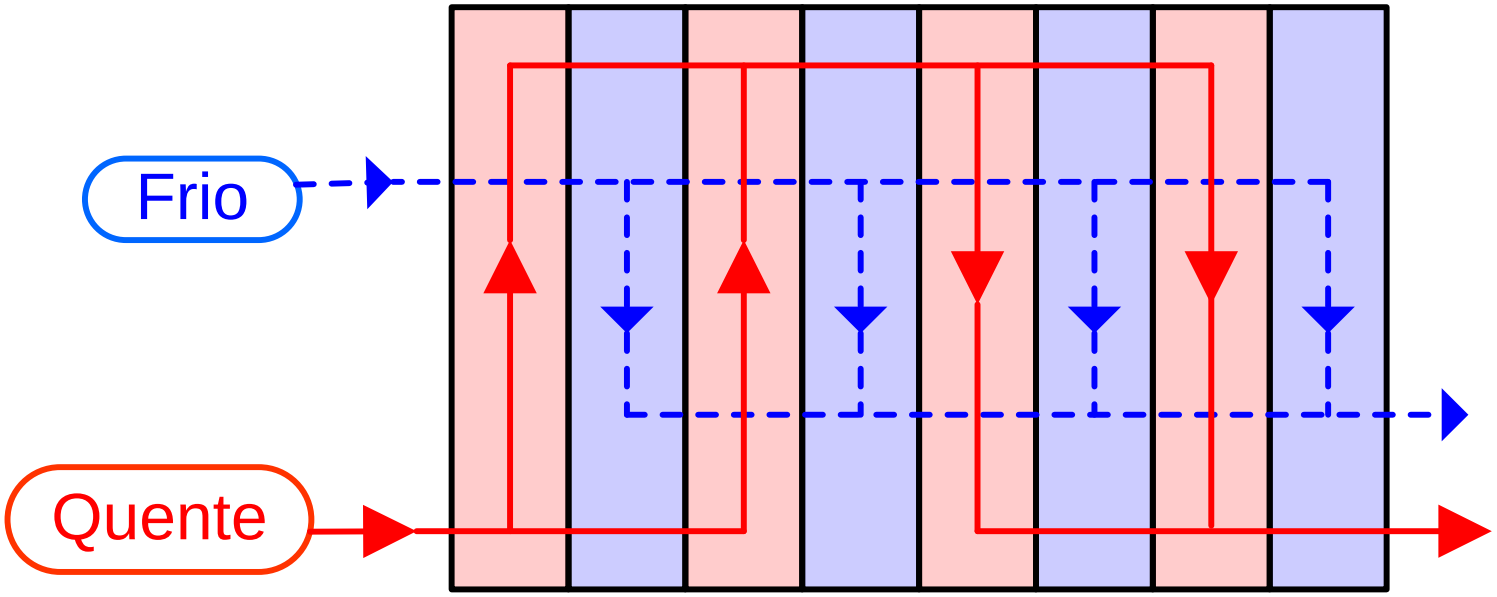
Arranjo Paralelo Tipo U
(1x4 / 1x4)

Trocador de Calor a Placas



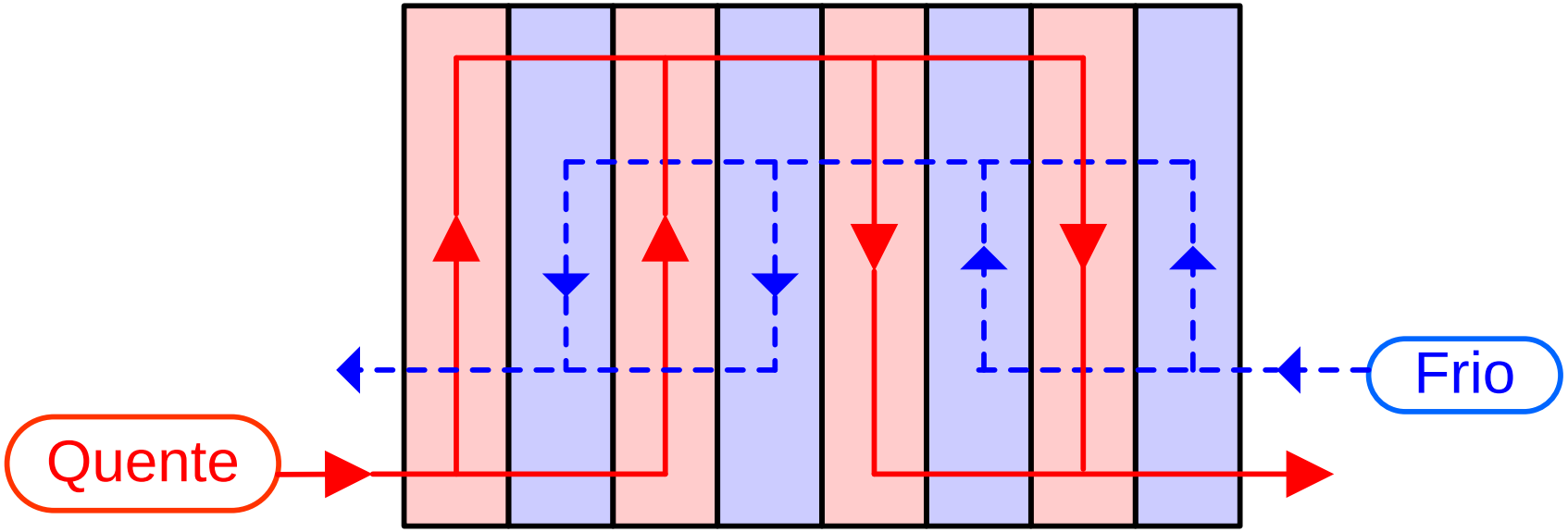
Arranjo em Série
(4x1 / 4x1)

Trocador de Calor a Placas



Arranjo Multipasse Assimétrico
(2x2 / 1x4)

Trocador de Calor a Placas



Arranjo Multipasse Simétrico
(2x2 / 2x2)

Trocadores a placa

- Regime laminar: Re < 400 *(o limite é diferente de tubos)*
- Regime turbulento: Re > 400

- *Utilizar diâmetro hidráulico (D_e):

- Correlações mais utilizadas:
  - Turbulento:

$$(Nu) = 0.374(\mathrm{Re})^{2/3}(Pr)^{1/3}(\eta/\eta_w)^{0.15}$$

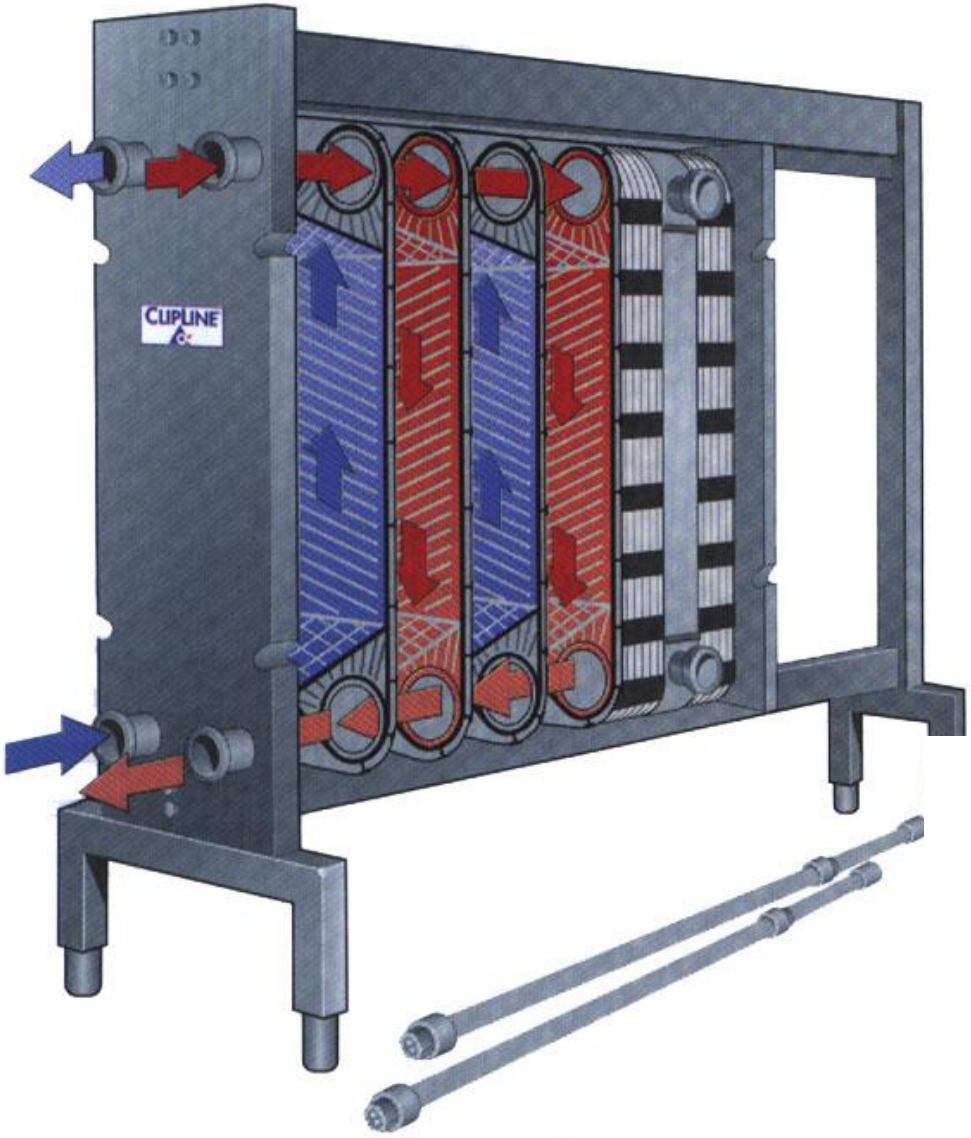
  - Laminar:

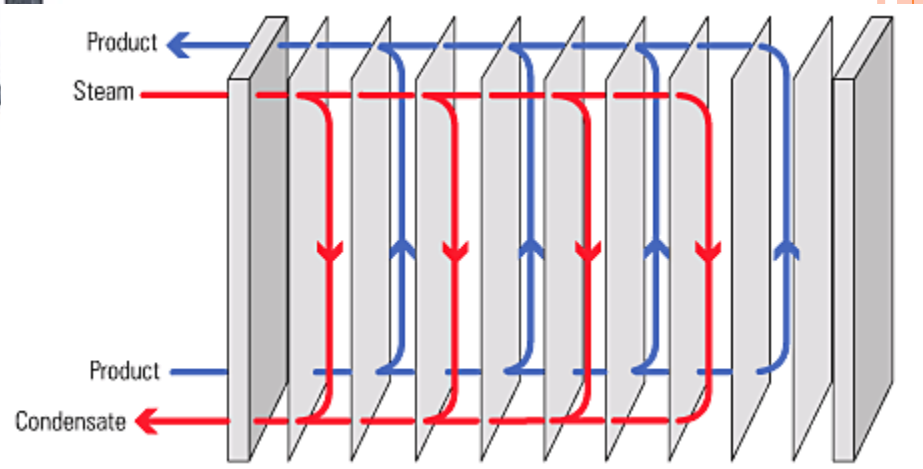
$$h = 0.742\hat{C}_p G(\mathrm{Re})^{-0.62}(Pr)^{-2/3}(\eta/\eta_w)^{0.14}$$

$$(\mathrm{Re}) = \frac{\rho v D_e}{\eta} = \frac{G D_e}{\eta}$$

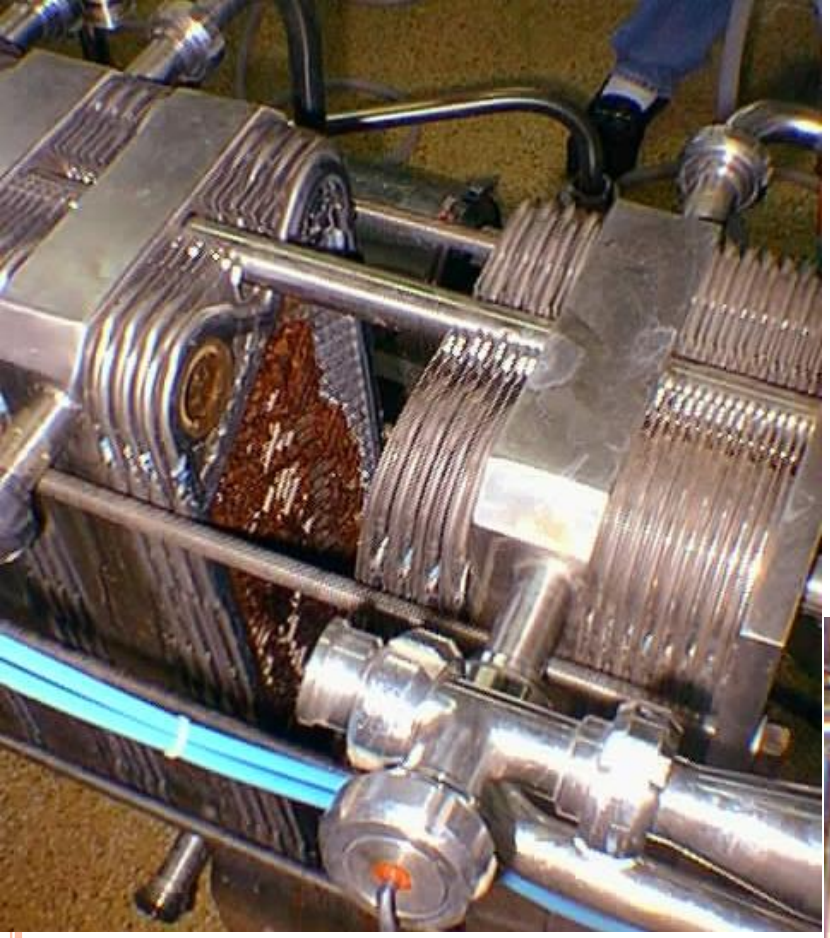
- Também é possível resolver os problemas utilizando-se as correlações para escoamento interno em tubos , levando em conta o diâmetro hidráulico *(seria uma aproximação)*.

Trocador de placas





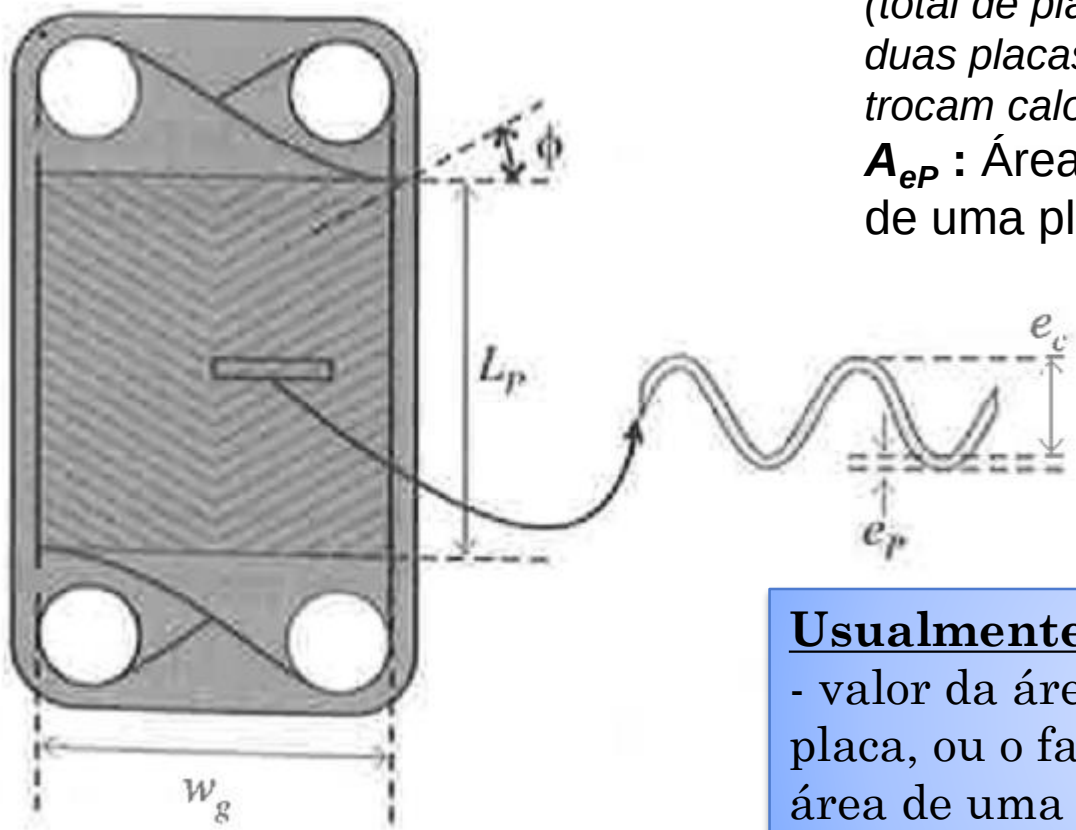
Incrustação de leite em trocador à placas



Área de troca térmica em trocadores a placas: $A = n_{pl}.A_{eP}$

***n_{pl}*. :** número de placas térmicas *(total de placas no pacote menos as duas placas da extremidade que não trocam calor)*

***A_{eP}* :** Área efetiva de troca térmica de uma placa

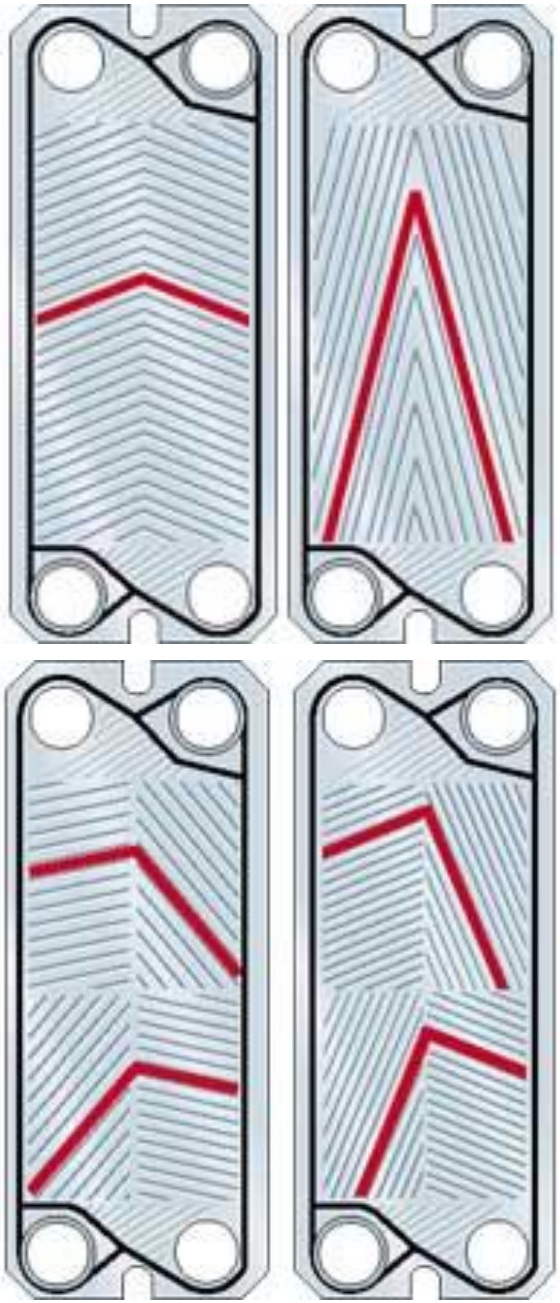


$$A_{eP} = f'_{AP}.L_P.w_g$$

<u>Usualmente fabricante fornece:</u>
- valor da área efetiva de troca de uma placa, ou o fator de alargamento da área de uma placa (f'_{AP})

Figura 10.18 Principais dimensões de um trocador de calor de placas, em que L_P é o comprimento da parte corrugada; w_g é a largura entre as gaxetas; e_P é a espessura da placa; e_c é a espessura do canal e ϕ é o ângulo da corrugação.

http://www.apiheattransfer.com



http://www.swepphe.com

shjxheatexchanger.en.alibaba.com

Coeficiente convectivo no canal de um trocador a placas com padrão "espinha de peixe":

$$Nu = b_1 (\mathrm{Re})^{b2} (\mathrm{Pr})^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

Tabela 10.3 Parâmetros de troca térmica para um trocador de calor de placas com padrão espinha de peixe

ϕ	N_{Re}	b_1	b_2
≤ 30°	≤ 10	0,718	0,349
	> 10	0,348	0,663
45°	< 10	0,718	0,349
	10 – 100	0,400	0,598
	> 100	0,300	0,663
50°	< 20	0,630	0,333
	20 – 300	0,291	0,591
	> 300	0,130	0,732
60°	< 20	0,562	0,326
	20 – 400	0,306	0,529
	> 400	0,108	0,703
≥ 65°	< 20	0,562	0,326
	20 – 500	0,331	0,503
	> 500	0,087	0,718

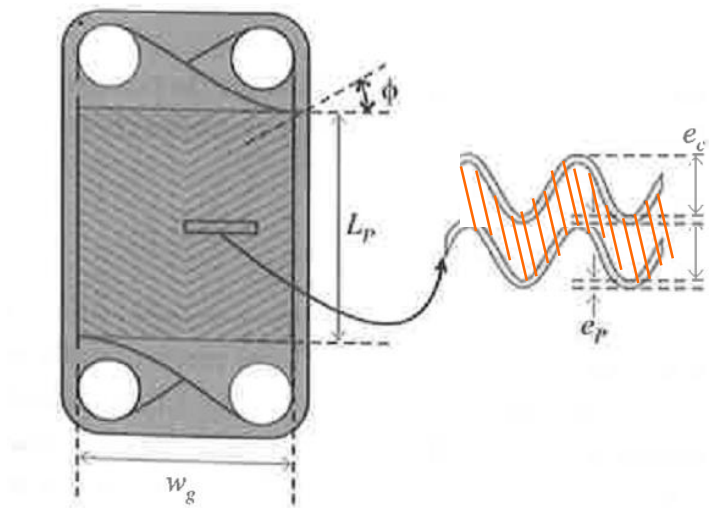
Fonte: Saunders (1988).

- Regime laminar: Re < 400 *(o limite é diferente de tubos)*
- Regime turbulento: Re > 400

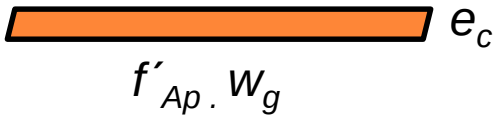
Coeficiente convectivo no canal de um trocador a placas com padrão "espinha de peixe":

$$Nu = b_1 (\mathrm{Re})^{b2} (\mathrm{Pr})^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0.14}$$

Re: utilizar diâmetro hidráulico: $4.A_s/P_w$



$$D_h = \frac{4 e_c w_g}{2(f'_{AP} w_g + e_c)}$$



Como $f'_{Ap} . w_g >>> e_c$

$$D_h = \frac{4 e_c \cancel{w_g}}{2 f'_{AP} \cancel{w_g}}$$

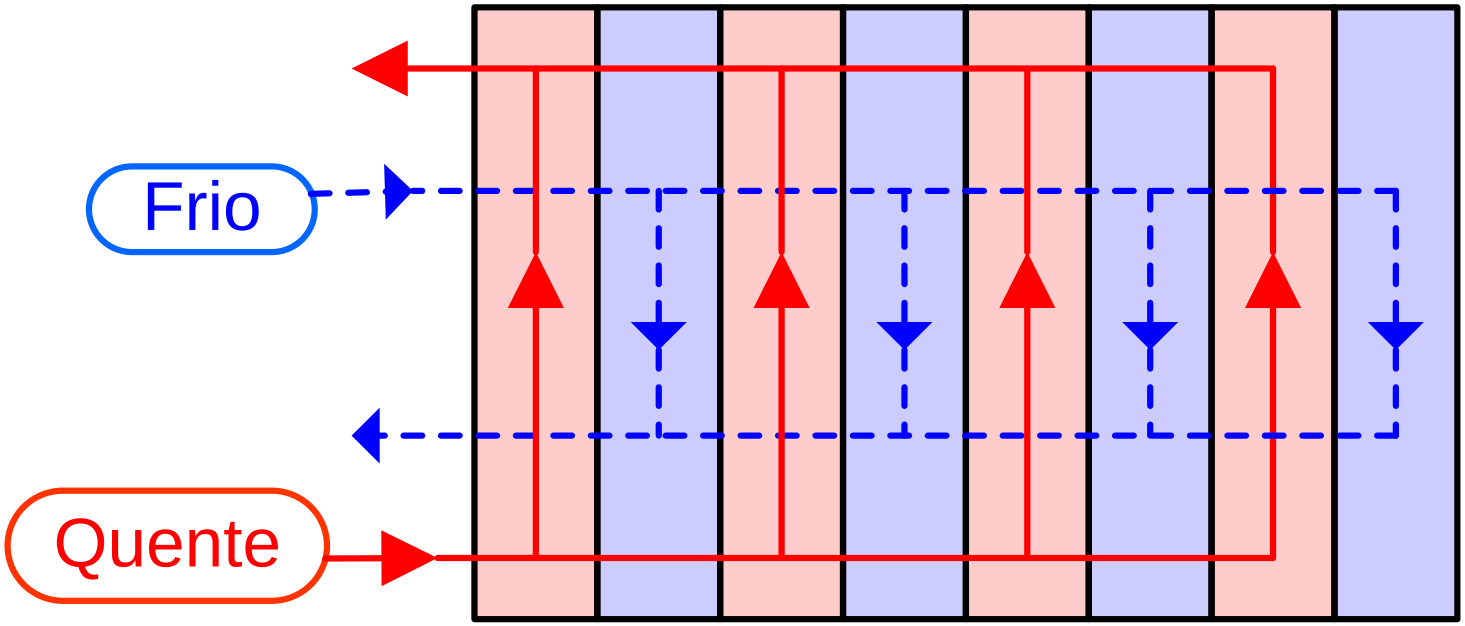
$$D_h = \frac{4 e_c}{2 f'_{AP}}$$

Para a velocidade média (v):

$$\bar{v} = \frac{\dot{Q}}{\left(\frac{n_c}{n_p} \right) A_s}$$

n_c: número de canais totais
n_p: número de passes
Q: vazão volumétrica (uniformemente distribuída entre os canais de um passe)

Trocador de Calor a Placas



Arranjo Paralelo Tipo U
(1x4 / 1x4)

Recapitulando…

Análise térmica:

$$q = U_i . A_i . \Delta T_{ml} = U_e . A_e . \Delta T_{ml}$$

Suposições :

- U constante ao longo de todo o trocador;
- Em cada seção perpendicular do trocador, as temperaturas dos fluidos podem ser representadas por temperaturas médias;
- Perdas de calor para o ambiente são nulas e o processo ocorre em regime permanente (equipamento já aquecido);
- Calores específicos dos fluidos são constantes.

Análise de Trocadores: Média logarítmica da temperatura (MLDT)

Log mean temperature difference (LMTD)

Fator de correção para geometria e escoamento

Trocadores com múltiplos passes e com escoamento cruzado:

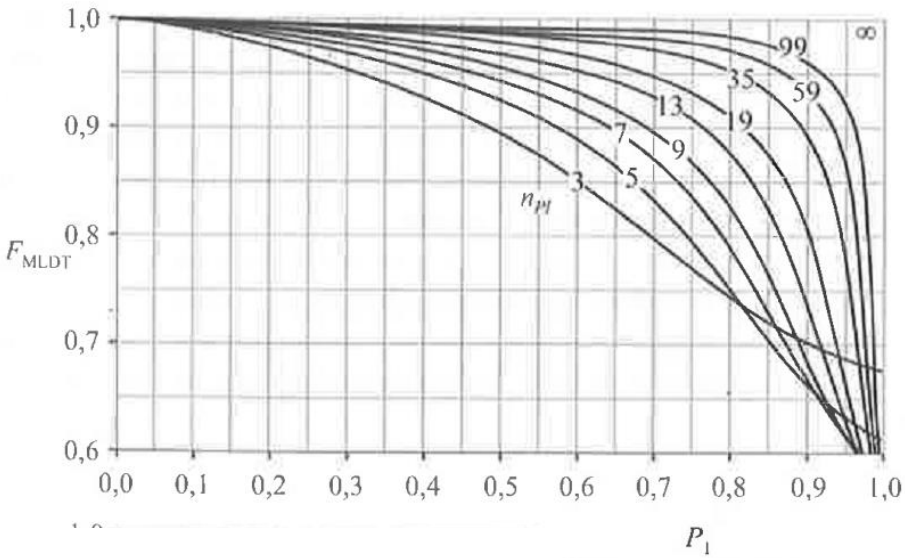
As equações anteriores podem ser utilizadas caso a seguinte modificação seja efetuada na média logarítmica das diferenças de temperaturas.

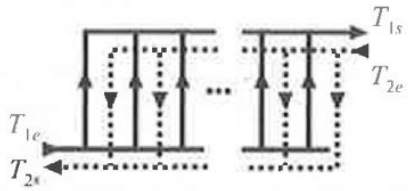
$$\Delta T_{ml} = F\,\Delta T_{ml,CC}$$

F: Fator de correção calculado com a hipótese de escoamento em contracorrente.

Foram desenvolvidas expressões algébricas para o fator de correção F para diversas configurações de trocadores de calor casco e tubos e trocadores de calor com escoamento cruzado.

TROCADORES DE CALOR A PLACAS



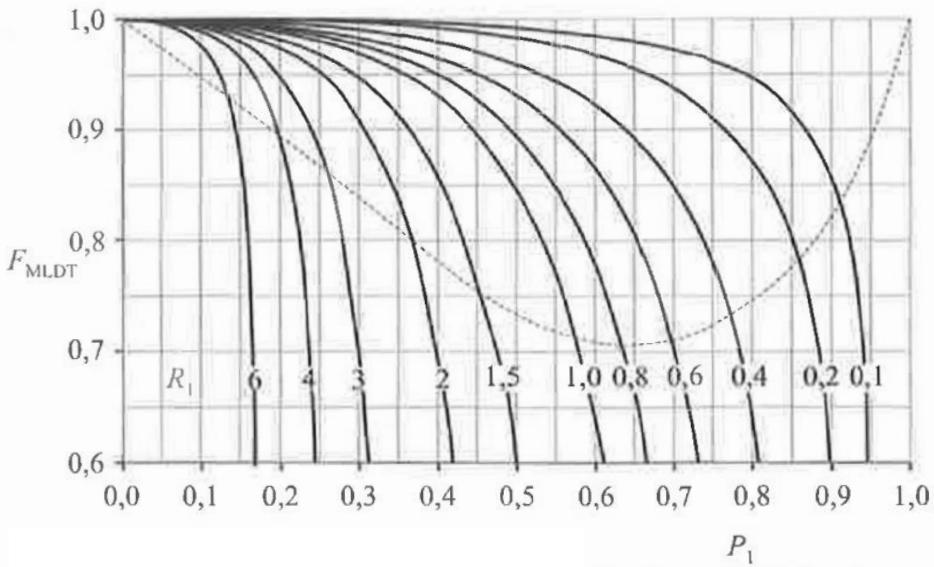


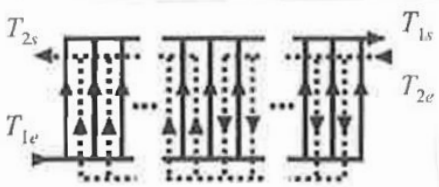
$$R_1 = \frac{(\dot{m}C_p)_1}{(\dot{m}C_p)_2} = \frac{T_{2e} - T_{2s}}{T_{1s} - T_{1e}} = 1{,}0$$

$$P_1 = \frac{T_{1s} - T_{1e}}{T_{2e} - T_{1e}}$$

Figura 10.14 Fator de correção da MLDT (F_{MLDT}) para um trocador de calor de placas contracorrente com arranjo de passes 1/1, número ímpar de placas térmicas e razão entre as capacidades térmicas R_1 = 1,0.

TROCADORES DE CALOR A PLACAS





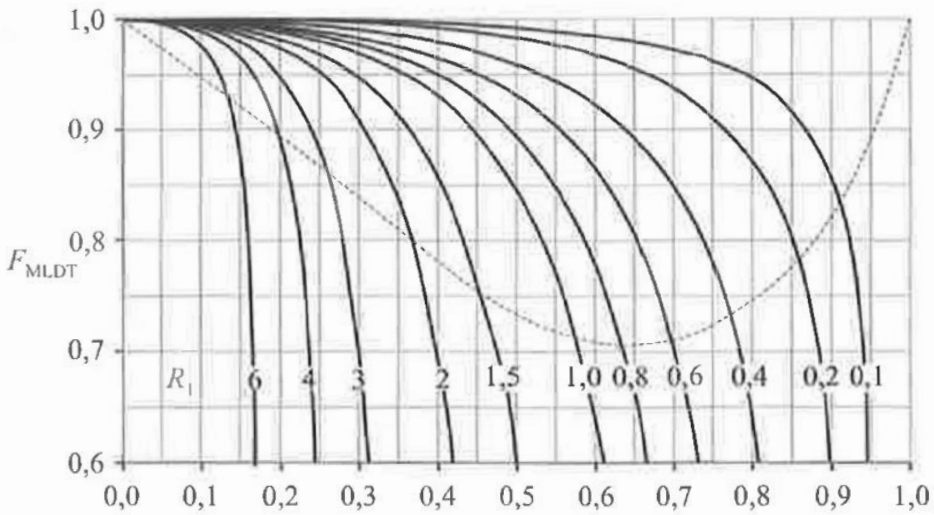
$$R_1 = \frac{(\dot{m}C_p)_1}{(\dot{m}C_p)_2} = \frac{T_{2e} - T_{2s}}{T_{1s} - T_{1e}}$$

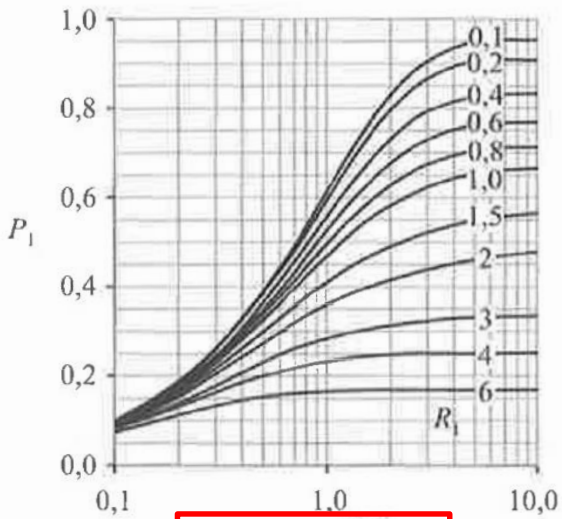
$$P_1 = \frac{T_{1s} - T_{1e}}{T_{2e} - T_{1e}}$$

Figura 10.15 Fator de correção da MLDT (F_{MLDT}) para um trocador de calor de placas com arranjo de passes 1/2 ou 2/1 e entrada em cantos diametralmente opostos do pacote de placas. Como foi assumida a hipótese de número infinito de placas, o valor de n_{pl} pode ser par ou ímpar.

Análise de Trocadores: Método Efetividade – NUT "Número de unidades de Transferência"

TROCADORES DE CALOR A PLACAS





$$\mathrm{NUT}_1 = \frac{UA}{(\dot{m}C_p)_1}$$

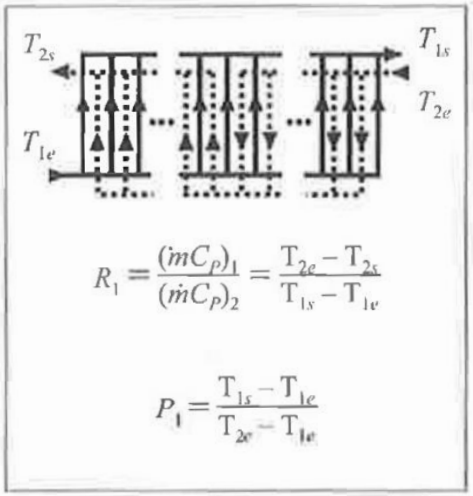


Figura 10.15 Fator de correção da MLDT (F_{MLDT}) para um trocador de calor de placas com arranjo de passes 1/2 ou 2/1 e entrada em cantos diametralmente opostos do pacote de placas. Como foi assumida a hipótese de número infinito de placas, o valor de n_{pl} pode ser par ou ímpar.

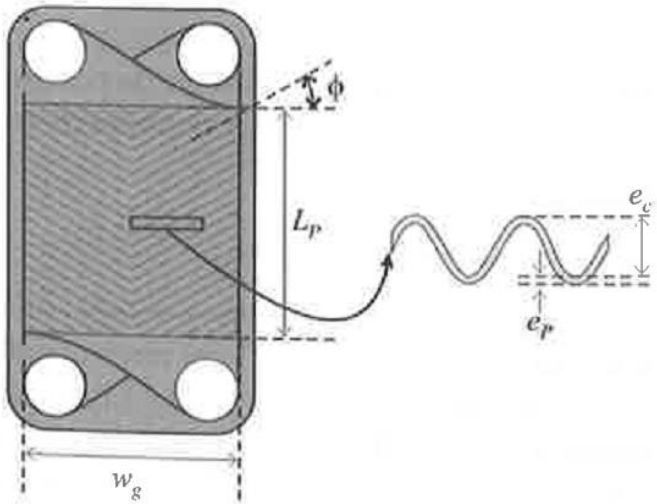
Exemplo 1

Leite recém-pasteurizado é resfriado em um trocador de calor a placas antes da etapa de embalagem. O trocador tem arranjo **2x10** e **1x21** para os fluidos quente e frio, respectivamente. A alimentação do leite é de **3800 kg/h** com **T = 45ºC**. Água de resfriamento a **2,0ºC** é alimentada no trocador com uma vazão de **6700 kg/h** no canto oposto ao da alimentação do leite.

As propriedades médias do leite são:
- densidade: $\rho = 1010$ kg.m^{-3}
- Calor específico: $C_p = 3643$ J.kg^{-1}K^{-1}
- Viscosidade: $\mu = 1{,}32$ mPa.s
- Condutividade térmica: k=0,59 W.K^{-1}.m^{-1}

As propriedades médias da água são:
- densidade: $\rho = 1000$ kg m^{-3}
- Calor específico: $C_p = 4210$ J.kg^{-1}K^{-1}
- Viscosidade: $\mu = 1{,}48$ mPa.s
- Condutividade térmica: k=0,58 W.K^{-1}.m^{-1}

As características da placa tipo espinha de peixe (f = 50º) são:
- Largura entre as gaxetas: $w_g = 42$ cm;
- Espessura da placa: $e_p = 0{,}7$ mm;
- Espessura do canal: $e_c = 3{,}5$ mm;
- Fator de alargamento da área da placa: $f_{AP} = 1{,}15$;
- Condutividade térmica do material da placa: $k_m = 17$ W.K^{-1}.m^{-1}
- Assumir $F_{MLDT} = 0{,}85$



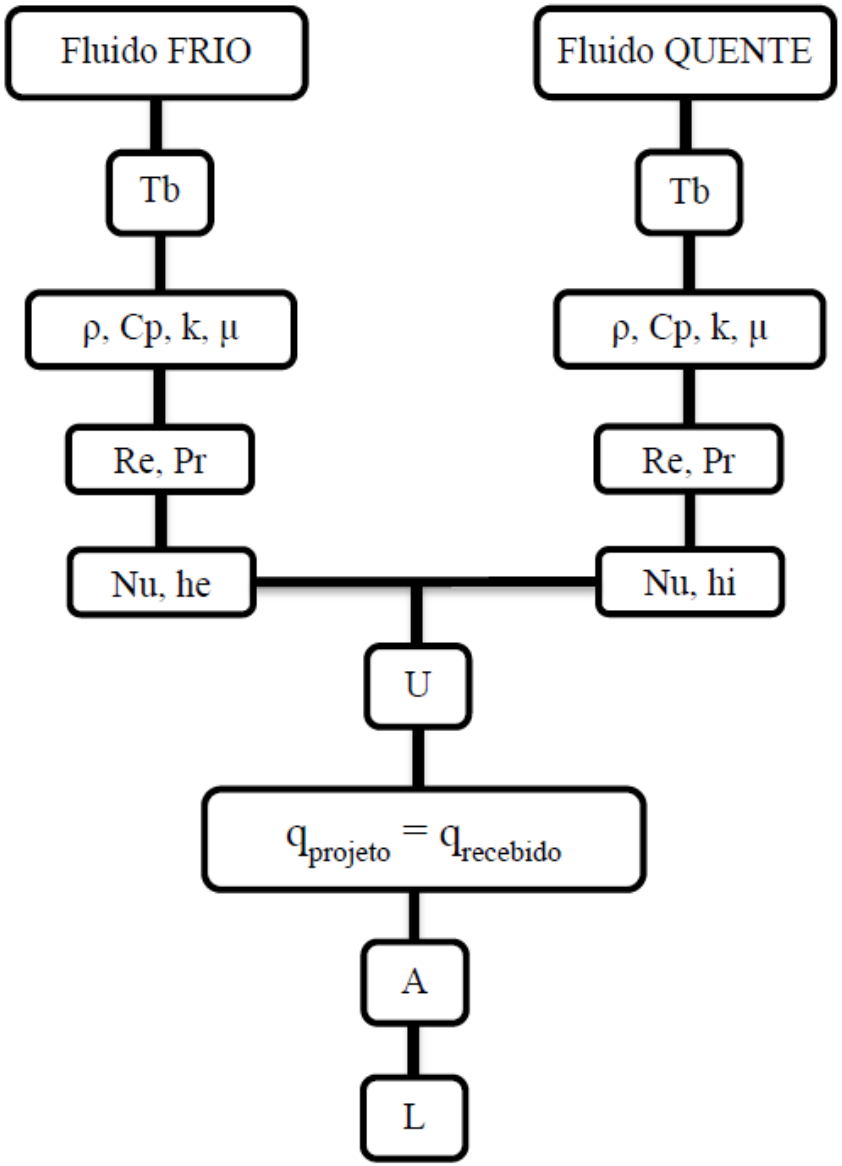
Organize os cálculos, projete o trocador e responda:

A) Desenhe a distribuição das vazões nesse trocador de calor e determine o número de placas térmicas onde ocorre escoamento em contracorrente e o número de placas térmicas onde ocorre escoamento em concorrente.

B) Determine o coeficiente global de troca térmica (U) limpo e sujo, levando em conta um fator de incrustação de 3.10^{-5} K.m^2.W^{-1} para a água e um valor 10x maior para o leite.

C) Determine a carga térmica, sabendo que a temperatura de saída do leite é 14,6ºC. Qual será então a temperatura de saída da água?

D) Determine a área de troca térmica considerando as incrustações, e o comprimento da parte corrugada da placa (L_P)


Fluido FRIO
Fluido QUENTE
Tb
Tb
ρ, Cp, k, μ
ρ, Cp, k, μ
Re, Pr
Re, Pr
Nu, he
Nu, hi
U
$q_{projeto} = q_{recebido}$
A
L