



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

# TROCADORES DE CALOR

DUÍLIO VENANZI

SÃO CARLOS  
2021

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



TROCADORES DE CALOR

DUIÍLIO VENANZI

SÃO CARLOS – 1984  
Publicação 009/84

# TROCADORES DE CALOR



## 1 - Considerações preliminares

O trocador de calor transfere calor de um fluido quente para um frio. O tipo mais simples é aquele em que num recipiente os fluidos são misturados diretamente, atingindo a mesma temperatura final. Os tipos mais comuns de trocador são os recuperadores, que apresentam os fluidos separados por meio de uma parede através da qual escoam o calor e que são muito empregados por apresentarem a facilidade de serem construídos com volume pequeno e grande superfície de troca de calor sensível ou latente.

## 2 - Tipos de trocadores

O tipo mais simples é o tubular tendo dois tubos concêntricos, o externo sendo a carcaça do conjunto; um dos fluidos escoam dentro do tubo interno e o outro pelo espaço entre os dois tubos. Se as correntes de fluido atravessam o trocador apenas uma vez o arranjo é dito de passe simples. Trocador de correntes paralelas é o que tem os fluidos movimentando-se na mesma direção e sentido; caso contrário é de correntes opostas.

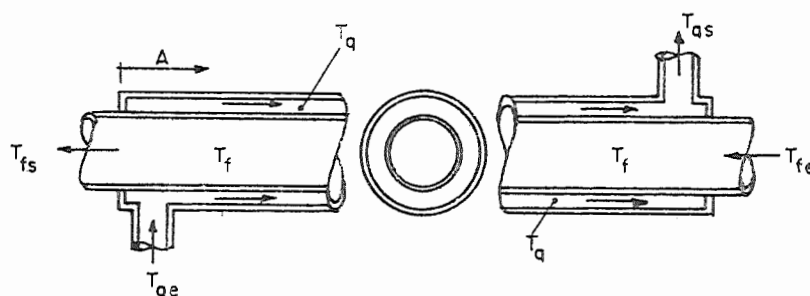


Figura 1 - Trocador de correntes opostas.

Se os fluidos escoam em direções ortogonais o recuperador é de correntes cruzadas. Há dois casos a considerar. Num deles cada um dos fluidos não se mistura ao passar através do trocador e, assim, as temperaturas dos fluidos na saída do trocador não são uniformes sendo mais quente em um lado do que no outro. O radiador

de automóvel é um exemplo. Neste arranjo o gás escoa sobre um feixe de tubos aletados e desta forma não se mistura, ficando confinado entre os canais formados pelas placas, ao passar através do trocador, conforme a figura 2.

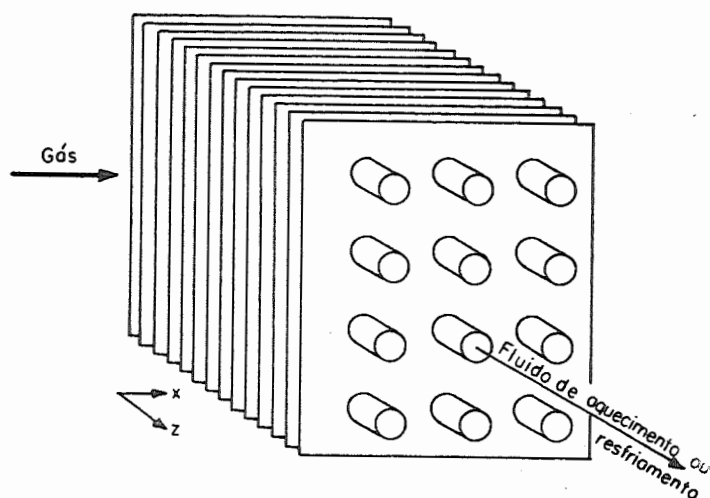


Figura 2 - Correntes cruzadas e fluidos não misturados.

A configuração das temperaturas, neste caso, apresenta-se como mostra a figura 3.

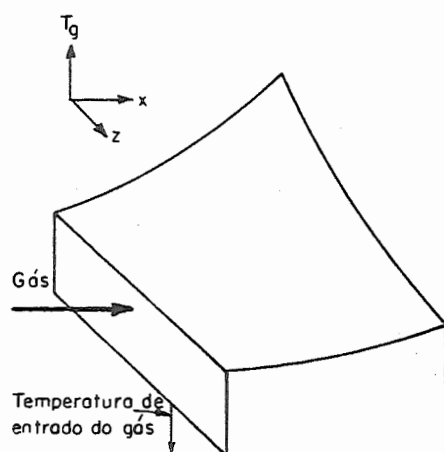


Figura 3 - Temperaturas em trocador de correntes cruzadas.

No segundo arranjo um dos fluidos não se mistura e, consequentemente, a temperatura não é uniforme na saída do trocador; o outro é misturado ao atravessar o trocador e a temperatura é uniforme em cada seção ao longo do escoamento variando apenas

em direção perpendicular ao fluxo do outro fluido. A figura 4 mostra o fluxo cruzado onde o ar é misturado ao atravessar o trocador e o gás quente não por estar confinado nos tubos.

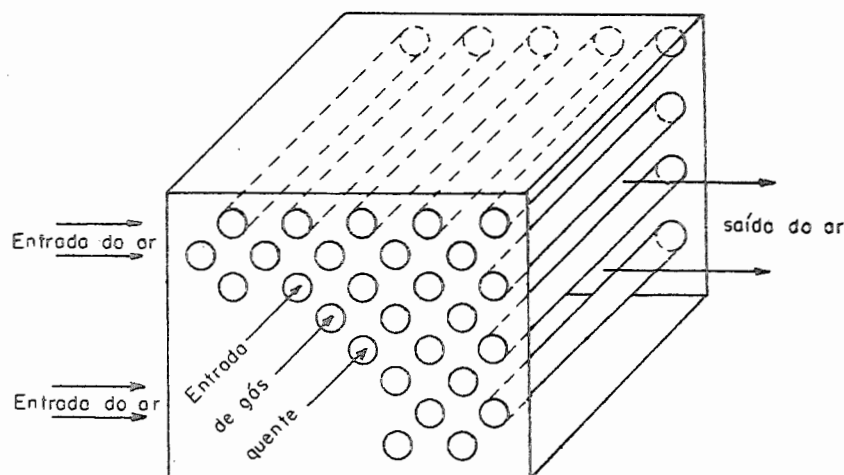


Figura 4 - Correntes cruzadas com um fluido misturado e o outro não.

Um terceiro arranjo, menos usual, corresponde à mistura de ambos os fluidos enquanto escoam através do trocador; neste caso a temperatura dos dois é uniforme e só varia na direção do escoamento.

Para aumentar a superfície de troca de calor por unidade de volume utiliza-se mais de um passe do fluido através dos tubos forçando o que escoam externamente a fazê-lo em zigue-zague, como ilustra a figura 5, onde há dois passes de tubos e defletores ou chicanas transversais ao fluido, em passe único, que se movimenta entre a carcaça e os tubos.

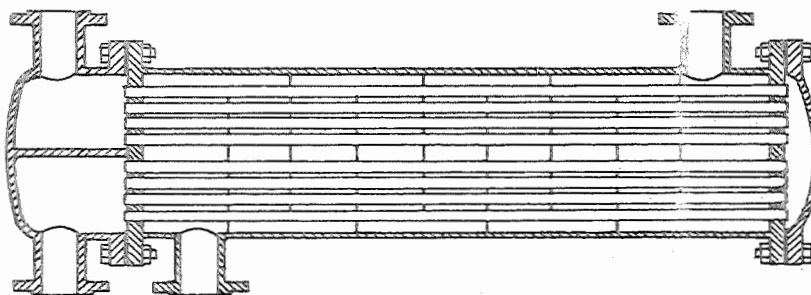


Figura 5 - Trocador com defletores: dois passes dos tubos e um passe na carcaça.

Na figura 6 são apresentados alguns tipos de defletores.

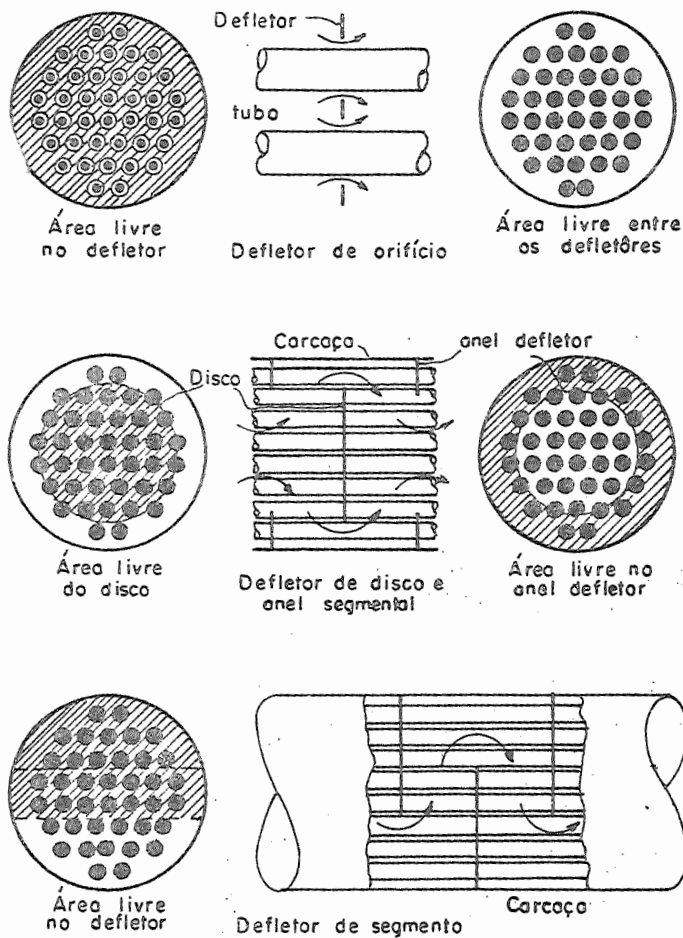


Figura 6 - Três tipos de defletores em trocadores de carcaça e tubo.

Quanto à colocação dos tubos nas placas o trocador pode tê-los soldados ou "flanqueados". Sempre que necessário, contudo, é conveniente a remoção do feixe de tubos para limpeza o que é resolvido com uma das placas aparafusada a uma tampa flutuante que permite o movimento relativo entre o feixe e a carcaça.

### 3 - Diferença média de temperatura.

As temperaturas dos fluidos que trocam calor entre si variam continuamente ao longo da linha de troca. As ilustrações 7 referem-se aos vários tipos de escoamentos em um trocador de passe simples de carcaça e tubo já visto na figura 1. As distâncias entre as linhas das figuras correspondem às diferenças de temperatura entre os dois fluidos.

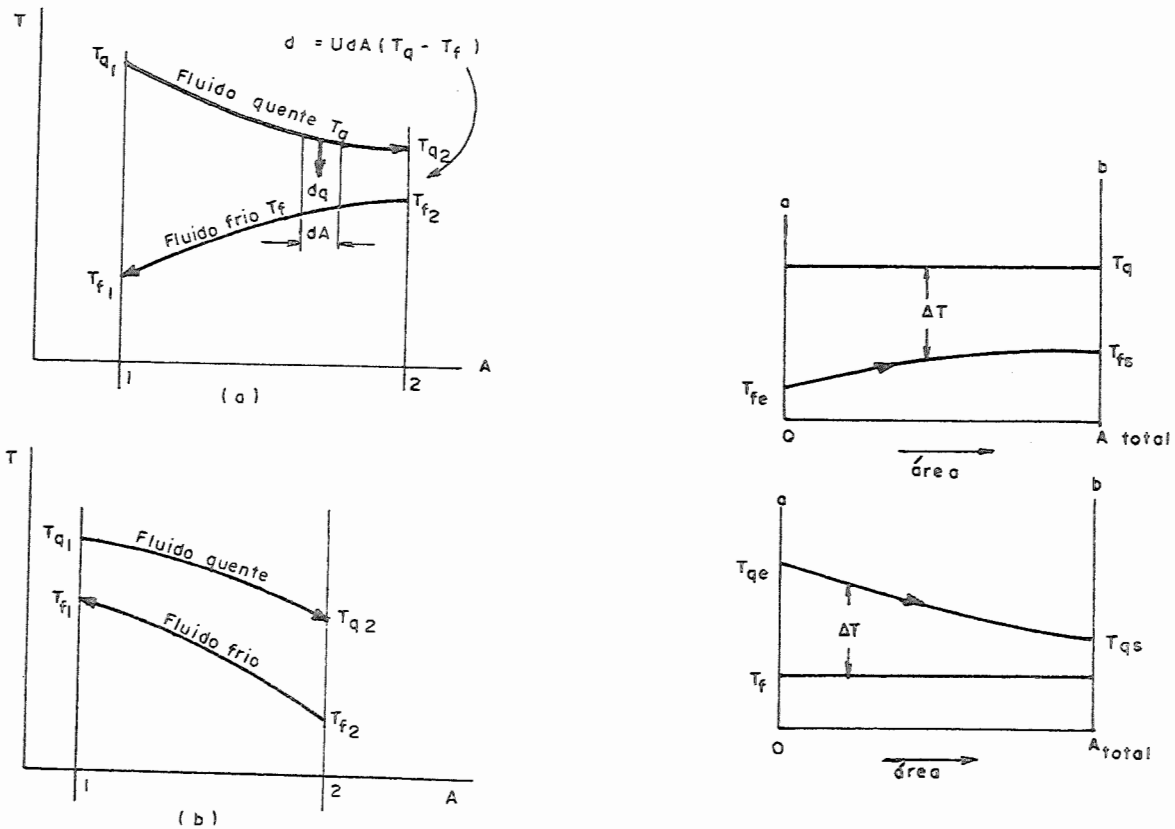


Figura 7 - Perfis de temperatura para trocadores de calor de tubo duplo.

As figuras da esquerda correspondem às variações de temperatura em trocadores de correntes paralelas e de correntes opostas sem mudança de fase. As da direita vinculam-se aos casos em que um dos fluidos condensa ou evapora, respectivamente. Nota-se que no caso de correntes paralelas a temperatura final do fluido mais frio jamais alcança a de descarga do mais quente, qualquer que seja o comprimento do trocador. Em correntes opostas a temperatura final do fluido frio pode superar a de descarga do quente. Outra vantagem deste arranjo reside na maior área de superfície de troca para dada razão de escoamento de calor. Em qualquer dos casos referidos

$$dq = U dA \Delta T \quad (1)$$

deve ser integrada sobre a área de troca de calor  $A$ .

Supondo constante a condutância global  $U$ , desprezível a va

riação da energia cinética dos fluidos em escoamento e ser isolada termicamente a carcaça do trocador o balanço de energia sobre um elemento de área fornece

$$dq = -m_q c_{pq} dT_q = + m_f c_{pf} dT_f = U dA (T_q - T_f) \quad (2)$$

onde  $m$  é o fluxo de massa,  $c_p$  o calor específico à pressão constante e  $T$  a temperatura média do fluido. O sinal negativo no segundo termo é necessário para considerar o produto em valor absoluto pois  $dT_q$  é negativo já que ao longo do escoamento a temperatura do fluido quente cai (figura 7); pela mesma razão a terceira expressão tem o sinal positivo relacionado com o sentido do fluxo do fluido frio em trocador de correntes paralelas e opostas onde se dá crescimento da temperatura, isto é,  $dT_f$  é positivo. Os índices  $q$  e  $f$  referem-se, respectivamente, aos fluidos quente e frio.

Supondo a constância dos calores específicos com a temperatura e chamando  $mc = C$  o balanço de calor desde a admissão do fluido quente até uma seção genérica é dado pela expressão, no caso de correntes paralelas:

$$-C_q (T_q - T_{qe}) = C_f (T_f - T_{fe})$$

e

$$-C_q (T_q - T_{qe}) = C_f (T_{fs} - T_f)$$

para o caso de opostas; os índices e e s correspondem à entrada e saída.

Em ambos os casos a igualdade significa que o calor cedido pelo fluido quente é totalmente recebido pelo frio e que a quantidade trocada ocorre, obviamente, na mesma região onde se processa a entrega pelo fluido quente. Exemplificando, se for considerada a terça parte inicial da área de escoamento do fluido quente esta superfície de troca corresponde à terça parte também inicial da área de escoamento do fluido frio em correntes paralelas; mas corresponde à terça parte final de escoamento do fluido frio no caso em que as correntes são opostas.



Qualquer que seja o trocador simples chega-se à mesma expressão para o calor trocado em função das diferenças de temperaturas na entrada ( $\Delta T_a$ ) e na saída ( $\Delta T_b$ ), cujos valores relativos aos casos de correntes opostas e paralelas são, respectivamente,

$$\Delta T_a = T_{qe} - T_{fs} \quad \text{e} \quad \Delta T_b = T_{qs} - T_{fe}$$

e

$$\Delta T_a = T_{qe} - T_{fe} \quad \text{e} \quad \Delta T_b = T_{qs} - T_{fs}$$

A expressão da quantidade de calor citada pode ser deduzida para qualquer dos casos mas aqui será desenvolvida a partir de um trocador de correntes opostas.

Então, de (4)

$$T_q = T_{qe} + \frac{C_f}{C_q} (T_f - T_{fs})$$

Subtraindo  $T_f$  aos dois membros,

$$T_q - T_f = T_{qe} - T_f + \frac{C_f}{C_q} (T_f - T_{fs}) \quad (5)$$

Da (2)

$$C_f dT_f = U dA (T_q - T_f)$$

entrando com a (5) e rearranjando

$$\frac{dT_f}{T_{qe} - T_f + \frac{C_f}{C_q} (T_f - T_{fs})} = \frac{U dA}{C_f}$$

ou

$$\frac{dT_f}{T_{qe} + T_f \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right) - T_{fs} \frac{C_f}{C_q}} = \frac{U dA}{C_f}$$

que integrada ao longo do comprimento do trocador e em relação ao fluido frio (lembrando que  $\int \frac{dx}{a+bx} = \frac{1}{b} \cdot \ln(a+bx) + \text{cte.}$ ), for  
nece

$$\left( \frac{1}{\frac{C_f}{C_q} - 1} \right) \ln \frac{T_{qe} + T_{fs} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right) - T_{fs} \frac{C_f}{C_q}}{T_{qe} + T_{fe} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right) - T_{fs} \frac{C_f}{C_q}} = \frac{UA}{C_f} \quad (6)$$

Tomando a (4) para a área total, A, o denominador do logaritmo no 1º membro torna-se

$$\begin{aligned} T_{qe} + T_{fe} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right) - T_{fs} \frac{C_f}{C_q} &= T_{qe} - T_{fe} + T_{fe} \frac{C_f}{C_q} - T_{fs} \frac{C_f}{C_q} = \\ &= T_{qe} - T_{fe} + T_{fe} \left( \frac{T_{qe} - T_{qs}}{T_{fs} - T_{fe}} \right) + T_{fs} \left( \frac{-T_{qe} + T_{qs}}{T_{fs} - T_{fe}} \right) = T_{qs} - T_{fe} \end{aligned}$$

assim, a (6) transforma-se em

$$\left( \frac{1}{\frac{C_f}{C_q} - 1} \right) \ln \left( \frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}} \right) = \frac{UA}{C_f}, \text{ ou seja,}$$

$$\ln \frac{T_a}{\Delta T_b} = \frac{UA}{C_f} \times \frac{(C_f - C_q)}{C_q} = UA \left( \frac{1}{C_q} - \frac{1}{C_f} \right) \quad (7)$$

Levando-se em conta a área total de troca a quantidade de calor total é

$$q = C_f (T_{fs} - T_{fe}) = - C_q (T_{qs} - T_{qe}).$$

Então,

$$C_f = \frac{q}{T_{fs} - T_{fe}} \quad \text{e} \quad C_q = \frac{q}{T_{qe} - T_{qs}}$$

e a expressão (7) fica

$$\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b} = UA \left( \frac{T_{qe} - T_{qs}}{q} + \frac{T_{fe} - T_{fs}}{q} \right) = \frac{UA}{q} (\Delta T_a - \Delta T_b)$$

e finalmente,

$$q = UA \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (8)$$

que seria exatamente a mesma se tivesse sido desenvolvida para um trocador de passæ simples e correntes paralelas.

Na prática é conveniente usar uma diferença de temperatura média efetiva  $\overline{\Delta T}$ , para o trocador como um todo, definida por

$$q = UA \overline{\Delta T} \quad (9)$$

Da comparação de (8) com (9) resulta

$$\overline{\Delta T} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (10)$$

que é chamada de diferença de temperatura média total logarítmica; expressão válida, também, quando a temperatura de um dos fluídos é constante como acontece na evaporação ou na condensação.

Quando  $m_q c_{pq} = m_f c_{pf}$ , ou seja,  $C_q = C_f$ , então, da expressão (4) resulta

$$T_{qe} - T_q = T_{fs} - T_f$$

ou

$$T_q - T_f = T_{qe} - T_{fs}$$

o que significa dizer que a diferença de temperaturas  $(T_q - T_f)$  numa seção genérica do trocador é constante e igual a  $(T_{qe} - T_{fs})$ . Neste caso a expressão (10) deixa de ter sentido e é substituída por

$$\overline{\Delta T} = \Delta T_a = \Delta T_b$$

Embora  $U$  geralmente não seja constante é usual avaliar-se um valor constante em uma seção média entre os extremos do trocador. Se a variação de  $U$  for considerável dever-se-á integrar a (1).

Para trocadores mais complexos que os anteriormente citados, como é o caso dos que apresentam vários passes de tubos na carcaça ou, então, os de correntes cruzadas com escoamentos misturados ou não, a determinação de uma expressão para a diferença de temperatura média é bastante difícil. Para estes, o  $\overline{\Delta T}$  (10) é modificado através de fatores de correção como os mostrados em ordenada ( $F$ ) nos gráficos das figuras 8, 9, 10 e 11. Em abcissa é lançado o adimensional

$$p = \frac{T_{ts} - T_{te}}{T_{ce} - T_{te}} \quad (11)$$

onde  $t$  e  $c$  referem-se ao fluido no tubo e na carcaça e os índices  $e$  e  $s$  às condições na entrada e na saída. O parâmetro para cada curva é igual à razão dos produtos da massa que escoou pela capacidade térmica dos dois fluidos

$$\frac{m_t c_{pt}}{m_c c_{pc}}$$

esta relação sendo, também, igual à variação de temperatura do fluido na carcaça dividida pela variação de temperatura do fluido nos tubos,

$$z = \frac{m_t c_{pt}}{m_c c_{pc}} = \frac{T_{ce} - T_{cs}}{T_{ts} - T_{te}} \quad (12)$$

pois, teoricamente,

$$q = m_t c_{pt} (T_{ts} - T_{te}) = m_c c_{pc} (T_{ce} - T_{cs})$$

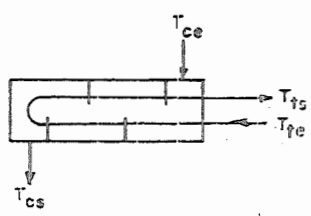
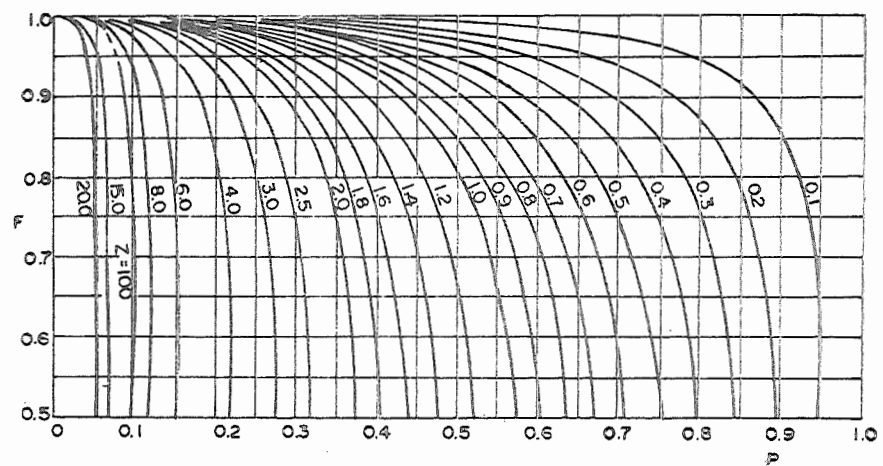


Figura 8 - Fator de correção para  $\Delta T$  do trocador de correntes opostas com ~~dois~~ <sup>um</sup> passas na carcaça e dois, ou múltiplos de dois, passas de tubos.

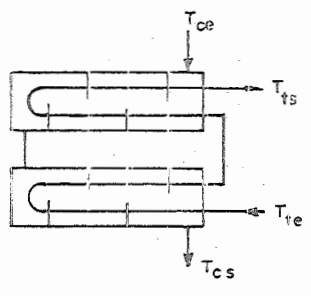
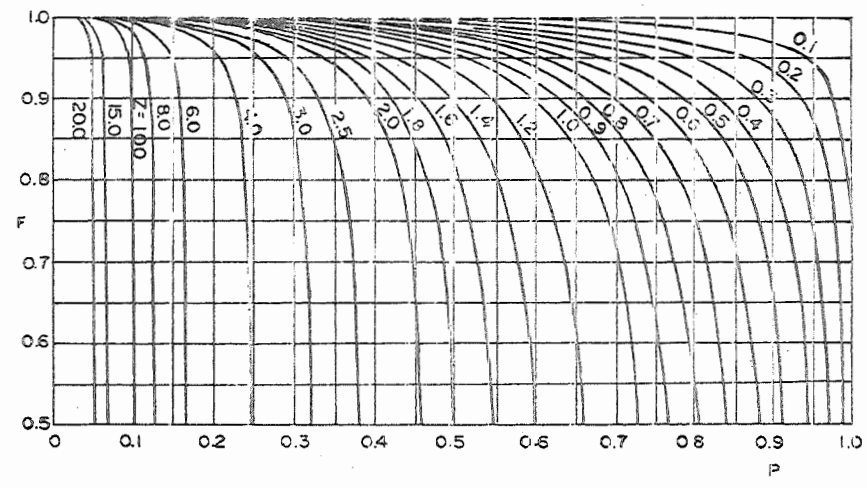


Figura 9 - Fator de correção para  $\Delta T$  do trocador de correntes opostas com dois passas na carcaça e um múltiplo de dois passas de tubos.

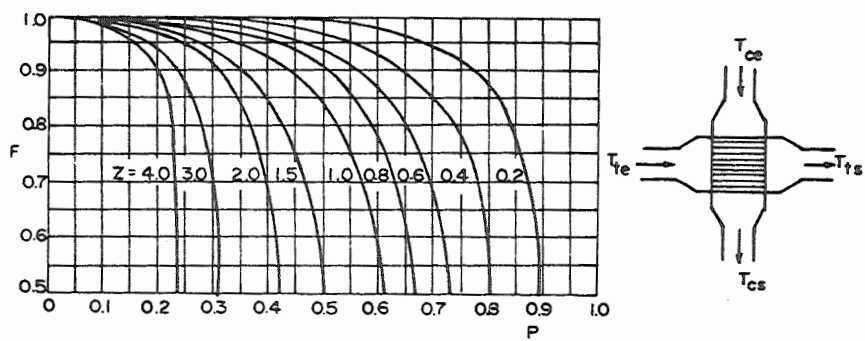


Figura 10 - Fator de correção para  $\overline{\Delta T}$  de correntes opostas para cruzadas, fluido misturado do lado, da carcaca, o outro não misturado, um passe de tu bo.

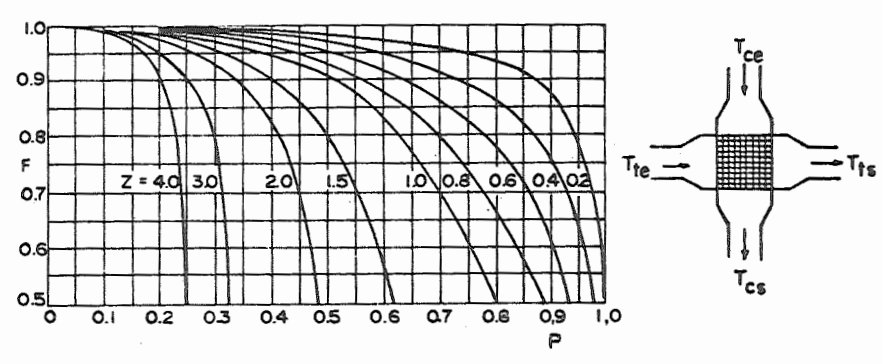


Figura 11 - Fator de correção para  $\overline{\Delta T}$  de correntes opostas para correntes cruzadas, ambos não misturados, um passe de tubos.

4 - Efetividade do trocador

Considerou-se, até aqui,

$$q = UA\overline{\Delta T}$$

o que é correto quando são conhecidas as temperaturas das extremidades do tubo e da carcaça.

Quando as temperaturas dos fluidos na saída não são conhecidas o método baseia-se em tentativas. Este tipo de problema pode ser encontrado quer na seleção de um trocador ou quando tendo sido ensaiado em determinada razão de escoamento passa a ser usado em outra condição.

Para se chegar a uma equação de transferência de calor sem o envolvimento com temperaturas extremas inicia-se por definir a efetividade do trocador,  $E$ , como sendo a relação entre a sua razão de transferência de calor efetiva para a máxima razão de troca possível, esta referida a um trocador de correntes opostas. Assim, dois casos limites se apresentam: a temperatura de entrada do fluido quente igualando-se à de saída do frio e a de saída do quente igualando-se à de entrada do frio (figura 12).

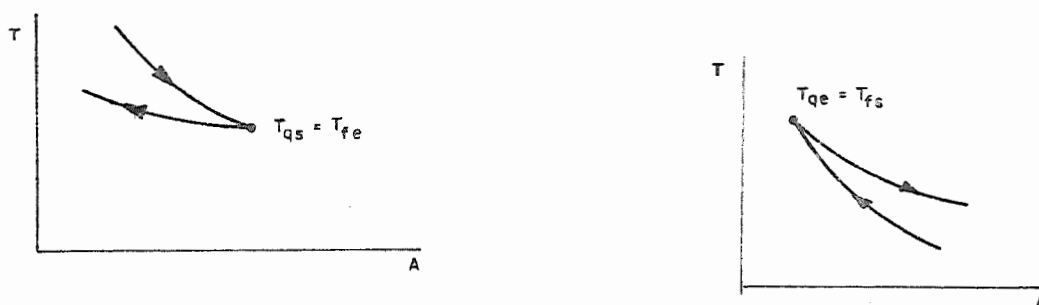


Figura 12 - Temperaturas em trocadores teóricos.

Na figura 12, à esquerda, vê-se que

$$q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = m_f c_{pf} (T_{qe} - T_{fe})$$

e, portanto,  $m_q c_{pq} > m_f c_{pf}$  pois  $T_{qs} > T_{fe}$  e  $T_{fs} = T_{qe}$

Pela segunda ilustração

$$q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = m_f c_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

e, portanto,  $m_q c_{pq} < m_f c_{pf}$  pois  $T_{qe} > T_{fs}$  e  $T_{qs} = T_{fe}$

Assim, tomada a diferença máxima de temperaturas no trocador, qualquer que seja o caso da figura 12 ele sempre corresponde ao menor produto  $mc$ . Por exemplo, se o trocador refere-se ao esquema da esquerda,

$$\Delta T_{\text{máx}} = T_{qe} - T_{fe},$$

logo  $m_f c_{pf}$  é menor do que o correspondente  $m_q c_{pq}$  pois a quantidade transferida do fluido quente para este frio é, teoricamente, a mesma; no caso do segundo esquema ter-se-ia o menor valor para  $m_q c_{pq}$ .

Então, o numerador de E expressa o calor efetivamente transferido entre os fluidos, qualquer que seja o tipo de trocador; no de correntes paralelas o numerador é

$$q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = m_f c_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

e no de correntes opostas

$$q = m_q c_{pq} (T_{qe} - T_{qs}) = m_f c_{pf} (T_{fs} - T_{fe})$$

no denominador de E é introduzida a razão máxima de transferência de calor dada pelo produto da citada diferença máxima das temperaturas com o menor dos valores  $mc$  dos fluidos do trocador.

Portanto, vista pelo calor saindo do fluido quente,

$$E = \frac{C_q (T_{qe} - T_{qs})}{C_{\min} (T_{qe} - T_{fe})} \quad (13)$$

ou, se vista pelo calor entrando no fluido frio,

$$E = \frac{C_f (T_{fs} - T_{fe})}{C_{\min} (T_{qe} - T_{fe})} \quad (14)$$

Por extensão, para os trocadores de correntes paralelas vale a mesma consideração. Isto é, supondo que um dos fluidos sofresse uma variação de temperatura igual à máxima diferença de temperatura presente no trocador,  $(T_{qe} - T_{fe})$ , e, como já foi dito, sendo a quantidade de calor cedido pelo quente igual à



recebida pelo frio, então esta máxima diferença de temperatura ocorre no fluido que tem o menor  $\underline{mc}$ . Portanto, a máxima troca de calor possível é  $C_{\min}(T_{qe} - T_{fe})$  e o valor de  $E$  fica dado por

$$E = \frac{C_q (T_{qe} - T_{qs})}{C_{\min} (T_{qe} - T_{fe})} \quad (15)$$

ou

$$E = \frac{C_f (T_{fs} - T_{fe})}{C_{\min} (T_{qe} - T_{fe})} \quad (16)$$

Finalmente, se o fluido quente é que apresenta menor  $\underline{mc}$  a (13) e a (15) tornam-se

$$E_q = \frac{T_{qe} - T_{qs}}{T_{qe} - T_{fe}} \quad (17)$$

e se o frio apresenta menor  $\underline{mc}$  a (14) e a (16) ficam

$$E_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fe}}$$

Lembrando a (7), deduzida para correntes opostas,

$$\ln \frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}} = UA \left( \frac{1}{C_q} - \frac{1}{C_f} \right)$$

ou

$$\frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}} = \exp \left[ \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right) \right] \quad (18)$$

Se o fluido frio é que apresenta  $C_{\min}$  viu-se que

$$E_f = \frac{T_{fs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fe}}$$

e sendo, nas opostas,

$$q = C_q (T_{qe} - T_{qs}) = C_f (T_{fs} - T_{fe})$$

então

$$T_{qe} - T_{qs} = \frac{C_f}{C_q} (T_{fs} - T_{fe})$$

Com estas expressões e trabalhando a expressão (18) chega-se a

$$\begin{aligned} \frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qs} - T_{fe}} &= \frac{T_{qe} - T_{fs}}{T_{qe} - \frac{C_f}{C_q} (T_{fs} - T_{fe}) - T_{fe} + T_{fs} - T_{fs}} = \\ &= \frac{T_{qe} - T_{fs}}{(T_{qe} - T_{fs}) + (T_{fs} - T_{fe}) \left(1 - \frac{C_f}{C_q}\right)} \end{aligned}$$

Tomando o inverso desta

$$\begin{aligned} \frac{T_{qs} - T_{fe}}{T_{qe} - T_{fs}} &= \frac{1}{\exp \frac{UA}{C_f} \left(\frac{C_f}{C_q} - 1\right)} = 1 + \frac{(T_{fs} - T_{fe}) \left(1 - \frac{C_f}{C_q}\right)}{T_{qe} - T_{fs} + T_{fe} - T_{fe}} = \\ &= 1 + \left[ \frac{1}{\left(\frac{C_f}{C_q} - 1\right)} + \frac{T_{qe} - T_{fe}}{(T_{fs} - T_{fe}) \left(1 - \frac{C_f}{C_q}\right)} \right]^{-1} = \\ &= 1 + \left[ \frac{1}{\left(\frac{C_f}{C_q} - 1\right)} + \frac{1}{E_f \left(1 - \frac{C_f}{C_q}\right)} \right]^{-1} = \\ &= 1 + \left[ \frac{1}{\phi - 1} + \frac{1}{E_f (1 - \phi)} \right]^{-1} = 1 + \left[ \frac{-E_f + 1}{E_f (1 - \phi)} \right]^{-1} \end{aligned}$$

onde  $\phi = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$  e como  $m_f C_f = C_{\min}$  por hipótese, então pode-se considerar  $m_q C_q = C_{\max}$ .

Portanto,

$$\frac{1}{\exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)} = 1 + \left[ \frac{1 - E_f}{E_f (1 - \phi)} \right]^{-1}$$

$$\frac{1 - \exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)}{\exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)} = \left[ \frac{1 - E_f}{E_f (1 - \phi)} \right]^{-1}$$

$$\frac{E_f (1 - \phi)}{1 - E_f} = \frac{1 - \exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)}{\exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)}$$

Então,

$$E_f = \frac{1 - \exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)}{1 - \phi \exp \frac{UA}{C_f} \left( \frac{C_f}{C_q} - 1 \right)} = \frac{1 - \exp \left[ \left( \frac{-UA}{C_{\min}} \right) \left( 1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]}{1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \exp \left[ \left( \frac{-UA}{C_{\min}} \right) \left( 1 - \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]} \quad (18)$$

Para correntes paralelas ter-se-ia

$$E_f = \frac{1 - \exp \left[ \left( \frac{-UA}{C_{\min}} \right) \left( 1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}} \right) \right]}{1 + \frac{C_{\min}}{C_{\max}}} \quad (19)$$

Se o fluido quente tivesse a menor taxa de capacidade térmica,  $C_{\min} = m_q c_q$ , encontrar-se-ia as mesmas expressões (18) e (19); claro que nestes casos  $C_{\max}$  seria  $m_f c_f$ .

É usual a denominação NUT (número de unidades de transferência de calor) para o termo  $\frac{UA}{C_{\min}}$ . O número UA representa a medida da troca de calor de um equipamento e quanto maior o seu valor tanto mais se aproxima do seu limite termodinâmico de transferência.

Nas figuras 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são vistas as relações de efetividade para alguns arranjos de trocadores de calor e nas tabelas A e B a correlação entre a geometria do escoamento e a efetividade.

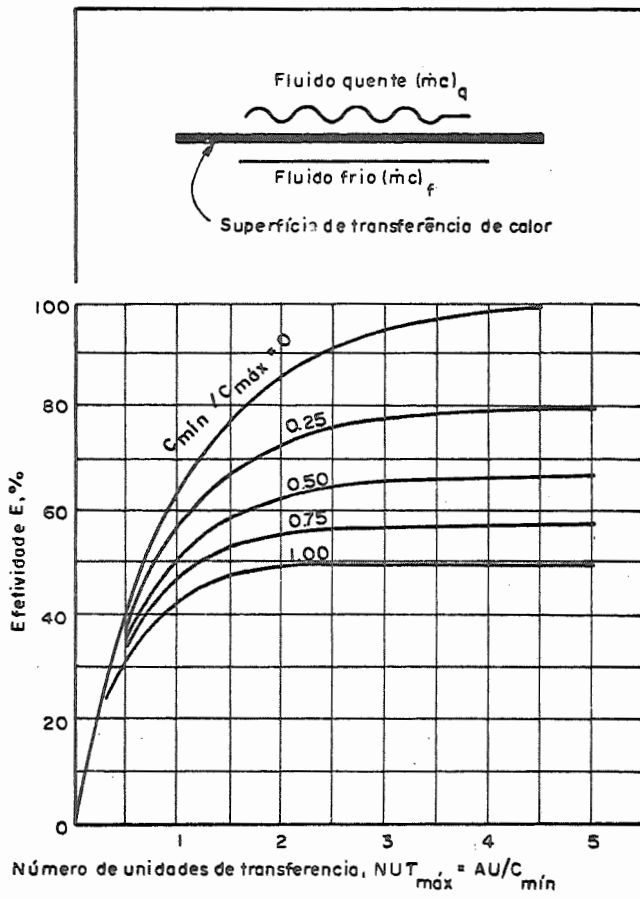


Figura 13 - Efetividade em correntes paralelas.

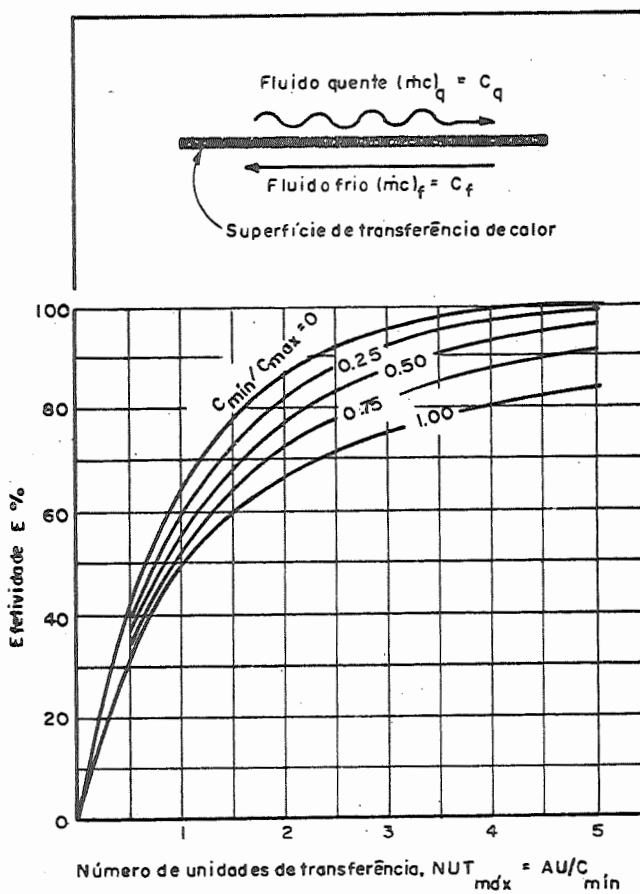


Figura 14 - Efetividade em contracorrente.

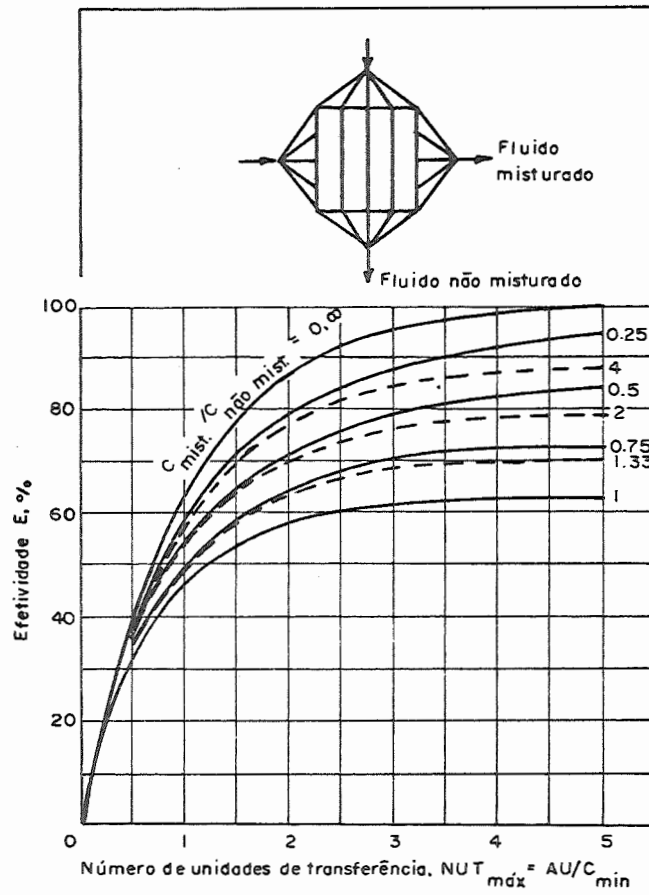


Figura 15 - Efetividade em correntes cruzadas com um fluido misturado.

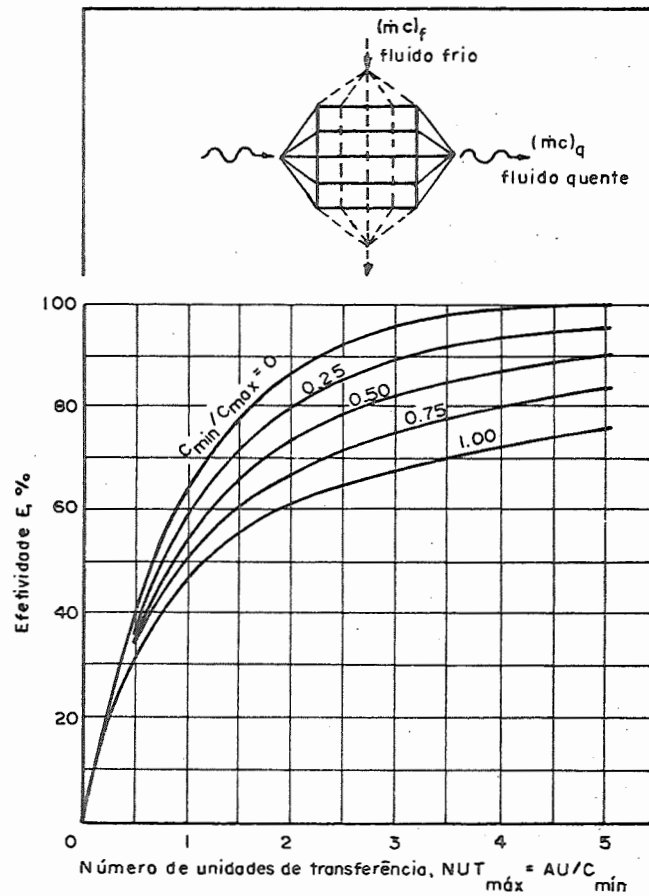


Figura 16 - Efetividade em correntes cruzadas com os fluidos não misturados.

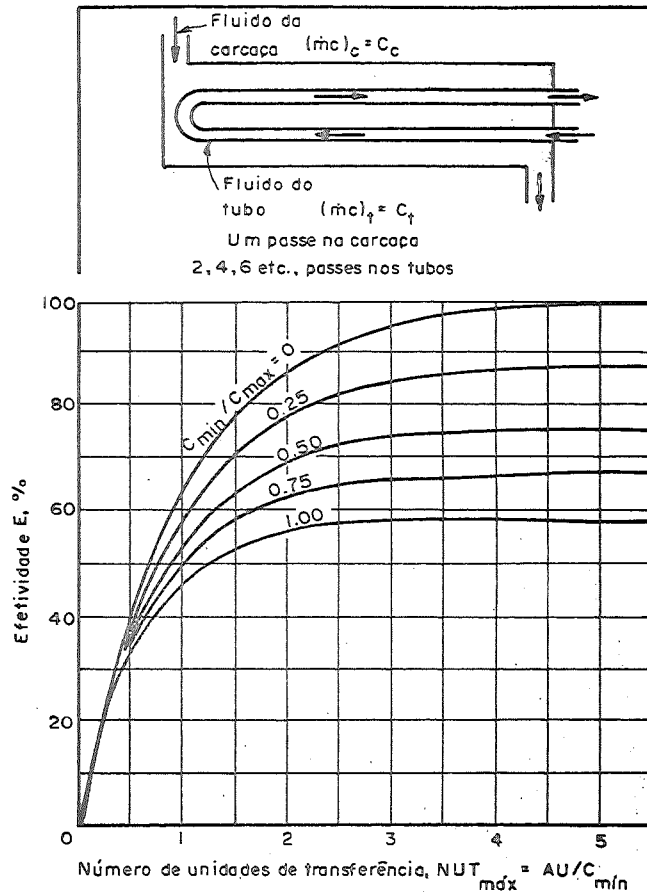


Figura 17 - Efetividade do trocador de tubo e carcaça com um passe na carcaça e um número par de passes nos tubos.

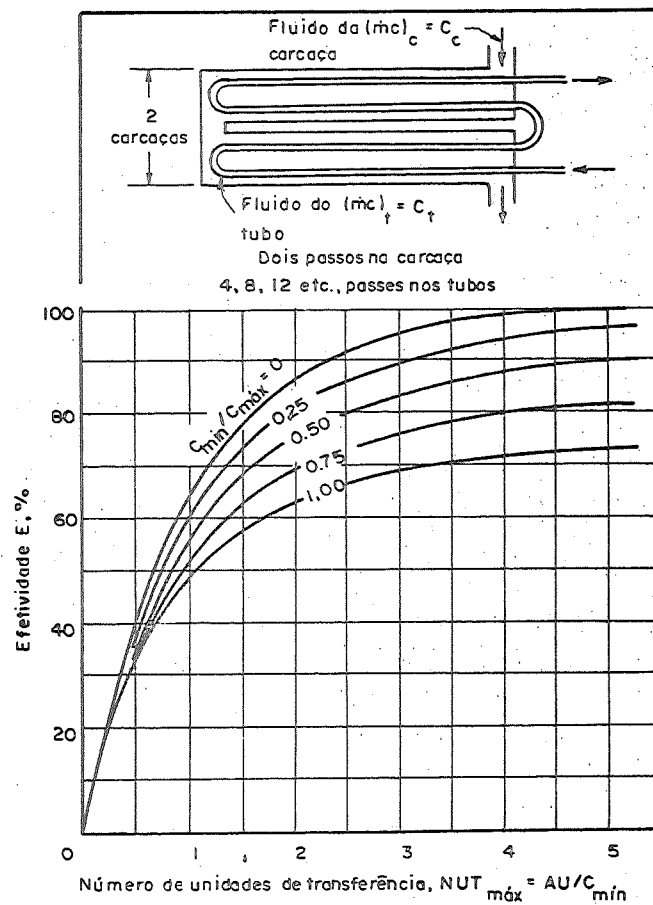


Figura 18 - Efetividade do trocador de tubo e carcaça com dois passes na carcaça e duas vezes um número par de passes nos tubos.

Tabela A: Relações da efetividade para trocadores de calor.

$$N = NUT = \frac{UA}{C_{\min}} \quad C = \frac{C_{\min}}{C_{\max}}$$

Geometria do escoamento	Relação
<b>Tubo duplo</b>	
Correntes paralelas	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1 + C)]}{1 + C}$
Contracorrente	$\epsilon = \frac{1 - \exp[-N(1 - C)]}{1 - C \exp[-N(1 - C)]}$
Contracorrente, $C = 1$	$\epsilon = \frac{N}{N + 1}$
<b>Escoamento cruzado</b>	
Ambos os fluidos não misturados	$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{\exp(-NCn) - 1}{Cn}\right]$ onde $n = N^{-0,22}$
Ambos os fluidos misturados	$\epsilon = \left[\frac{1}{1 - \exp(-N)} + \frac{C}{1 - \exp(-NC)} - \frac{1}{N}\right]^{-1}$
$C_{\max}$ misturado, $C_{\min}$ não misturado	$\epsilon = (1/C) \left\{ 1 - \exp[-C(1 - e^{-N})] \right\}$
$C_{\max}$ não misturado, $C_{\min}$ misturado	$\epsilon = 1 - \exp\left\{- (1/C) [1 - \exp(-NC)]\right\}$
<b>Tubo e carcaça</b>	
Um passe na carcaça 2, 4, 6 passes nos tubos	$\epsilon = 2 \left\{ 1 + C + (1 + C^2)^{1/2} \frac{1 + \exp[-N(1 + C^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-N(1 + C^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
Todos os trocadores, $C = 0$	$\epsilon = 1 - e^{-N}$

Tabela B: Relações do NUT para trocadores de calor

$$C = C_{\min}/C_{\max} \quad \epsilon = \text{efetividade} \quad N = \text{NUT} = UA/C_{\min}$$

Geometria do escoamento	Relação
-------------------------	---------

Tubo duplo

Correntes paralelas 
$$N = \frac{-\ln [1 - (1+C)\epsilon]}{1 + C}$$

Contracorrente 
$$N = \frac{1}{C - 1} \ln \left( \frac{\epsilon - 1}{C - 1} \right)$$

Contracorrente,  $C = 1$  
$$N = \frac{\epsilon}{1 - \epsilon}$$

Escoamento cruzado

$C_{\max}$  misturado,  $C_{\min}$  não misturado 
$$N = -\ln \left[ 1 + \frac{1}{C} \ln(1 - C\epsilon) \right]$$

$C_{\max}$  não misturado,  $C_{\min}$  misturado 
$$N = \frac{-1}{C} \left[ 1 + C \ln(1 - \epsilon) \right]$$

Tubo e carcaça

Um passe na carcaça,  
2,4,6 passes nos tubos 
$$N = -1(1+C^2)^{-1/2} \ln \left[ \frac{2/\epsilon - 1 - C - (1+C^2)^{1/2}}{2/\epsilon - 1 - C + (1+C^2)^{1/2}} \right]$$

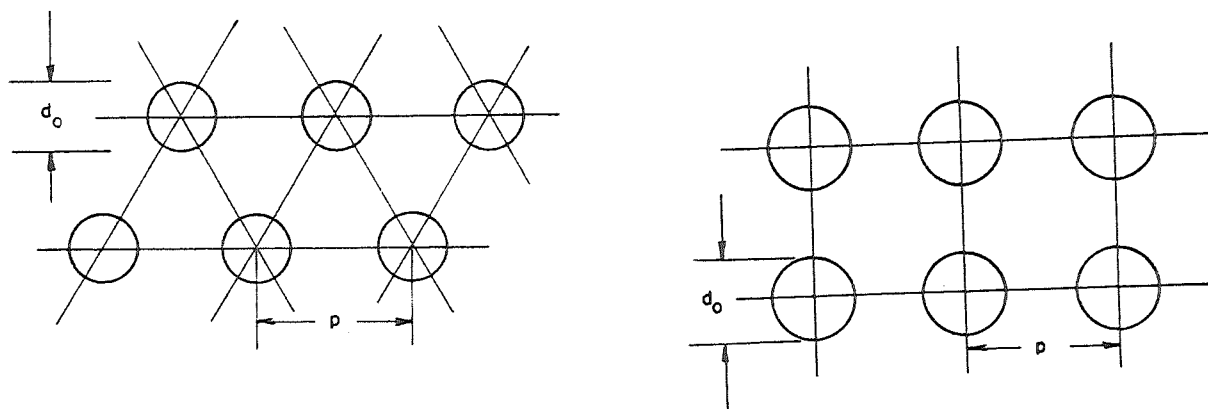
Todos os trocadores,  $C = 0$  
$$N = -\ln(1 - \epsilon)$$

## 5 - Disposição de tubos no interior da carcaça

Embora sempre ocorra a troca de calor entre o fluido quente e o frio, qualquer que seja a disposição geométrica dos tubos no interior da carcaça, é conveniente o encontro de arranjos padronizados que facilitem a fabricação, montagem e manutenção principalmente quando é grande o número de tubos.

São dois os arranjos mais usuais: de passo quadrado e de passo triangular. Tais denominações prendem-se às figuras geométricas obtidas unindo-se os centros dos tubos conforme as figuras 19 e 20. O passo é o lado do triângulo ou do quadrado.





Figuras 19 e 20 - Arranjos de passes triangular e quadrado.

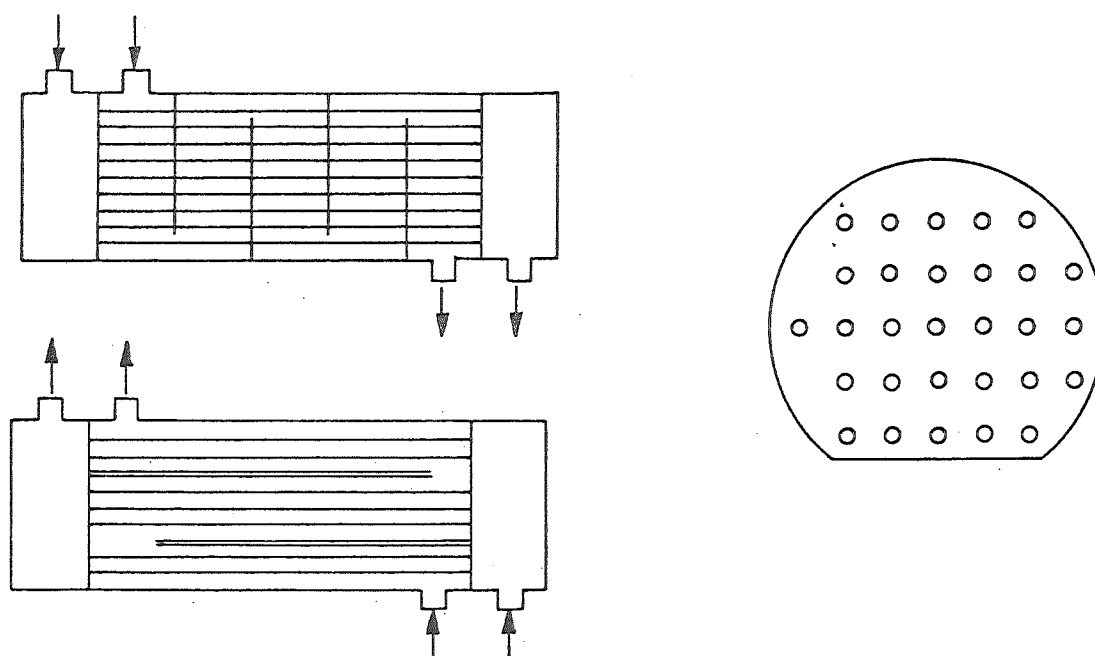


Figura 21 - Anteparos de trocadores

A distância entre os tubos é muitas vezes, bastante pequena podendo-se ter, por exemplo, trocadores com tubos, de 3/4" ou de 1" com distância entre as paredes exteriores entre tubos vizinhos no entorno de 1/4".

Outro detalhe também frequente nos recuperadores de calor é a utilização de anteparos (chicanas) verticais ou horizontais, conforme a figura 21 onde também é mostrado o aspecto de uma chicana vertical, que é uma chapa circular da qual é retirado um

segmento para dar passagem ao fluido da camisa e onde são feitos orifícios para a passagem dos tubos; a distância entre as chicanas varia de  $\frac{1}{5}$  a uma vez o diâmetro da camisa (carcaça).

Devido às chicanas ocorre o aumento da velocidade do fluido da camisa (a vazão é constante e o percurso é maior) é, consequentemente, aumentam os valores dos coeficientes de película.

## 6 - Diâmetros equivalentes

Para o cálculo dos coeficientes de película que integram o coeficiente global de transmissão de calor é necessária a determinação do diâmetro equivalente nos casos de tubos cilíndricos.

Relembrando que

$$D_{eq} = 4 r_h$$

sendo  $r_h$  o raio hidráulico, relação entre a área de escoamento e o perímetro molhado. Considere-se como exemplo um tubo concêntrico a outro, caso da ilustração esquerda da figura 22.

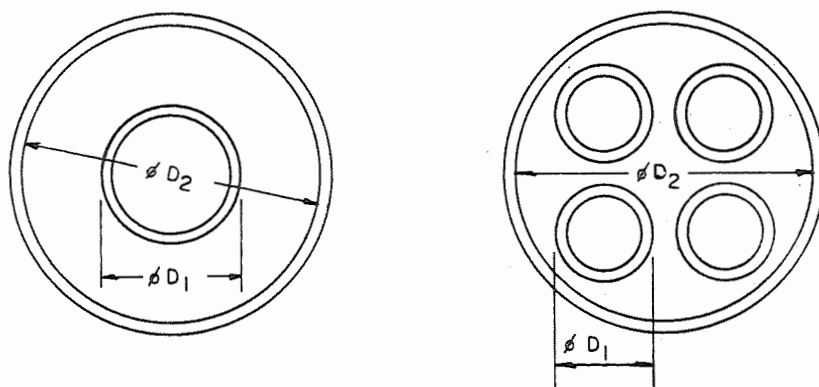


Figura 22 - Determinação do raio hidráulico.

Vê-se que a área da seção transversal ao escoamento é

$\frac{\pi}{4} (D_2^2 - D_1^2)$  e o perímetro molhado é  $\pi D_1$ ; logo,

$$r_{eq} = \frac{D_2^2 - D_1^2}{D_1}$$

Para o caso à direita dessa figura ter-se-ia

$$D_{eq} = 4 \frac{\frac{\pi}{4} (D_2^2 - 4D_1^2)}{\pi 4 D_1} = \frac{D_2^2 - 4D_1^2}{4 D_1}$$

Se fossem  $n$  tubos internos,

$$D_{eq} = \frac{D_2^2 - nD_1^2}{nD_1}$$

Em relação aos arranjos das figuras 19 e 20 ter-se-ão, respectivamente,

$$D_{eq} = 4 r_h = 4 \frac{p^2 - \frac{\pi d_o^2}{4}}{\pi d_o} = \frac{4p^2 - \pi d_o^2}{\pi d_o} \quad (20)$$

e

$$D_{eq} = 4 \frac{\frac{p^2 \sqrt{3}}{4} - \frac{\pi d_o^2}{8}}{\frac{\pi d_o}{2}} = \frac{2p^2 \sqrt{3} - \pi d_o^2}{\pi d_o} \quad (21)$$

## 7 - Bibliografia

Araújo, Celso de: "Transmissão de calor", Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1978.

Holman, J.P.: "Transferência de calor", McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1983.

Kreith, Frank: "Princípios da Transmissão de calor", Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1973.