# *Transferência de Calor 1*

Guedes, Luiz Carlos Vieira.

G924t Transferência de calor : um / Luiz Carlos Vieira Guedes. – Varginha, 2015.
80 slides; il.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader
Modo de Acesso: World Wide Web

1. Calor – Transmissão. I. Título. II. Fundação de Ensino e Pesquisa- FEPESMIG

CDD: 621.4022
AC: 115603

Elaborado por: Isadora Ferreira CRB-06 31/06

## Convecção:

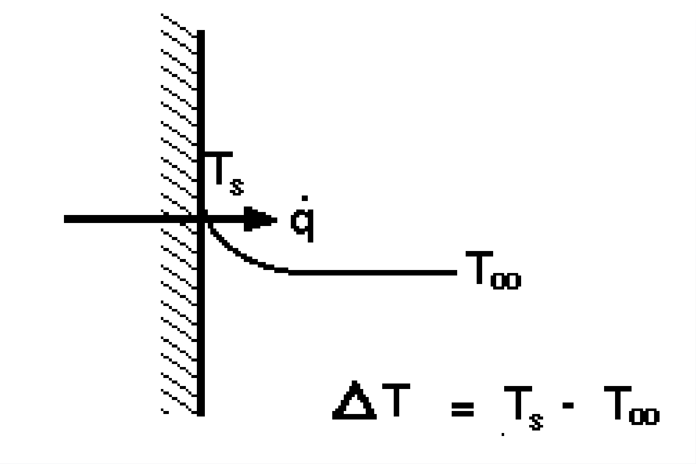
Processos de Troca de Calor que envolve a transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluído, líquido ou gás. Até este momento do curso, quando se queria o coeficiente de troca de calor por convecção, ele era dado no problema, entretanto vários outros fatores influem neste valor, fatores como velocidade, característica do fluido.

A partir de agora esses fatores passarão a fazer parte de nossos cálculos. Um fluído é capaz de resistir qualquer tensão de cisalhante nele imposta. Ele pode entrar em movimento pela diferença de massa específica (empuxo) ou por diferenças de pressão.

Convecção baseada em empuxos são chamadas de Convecção Livre ou Natural, a convecção promovida por diferenças de pressão é chamada de Convecção Forçada.

Até o presente momento calculamos convecção pela lei de resfriamento de Newton :

$$\mathbf{q = h\left(T_S - T_{00}\right)}$$

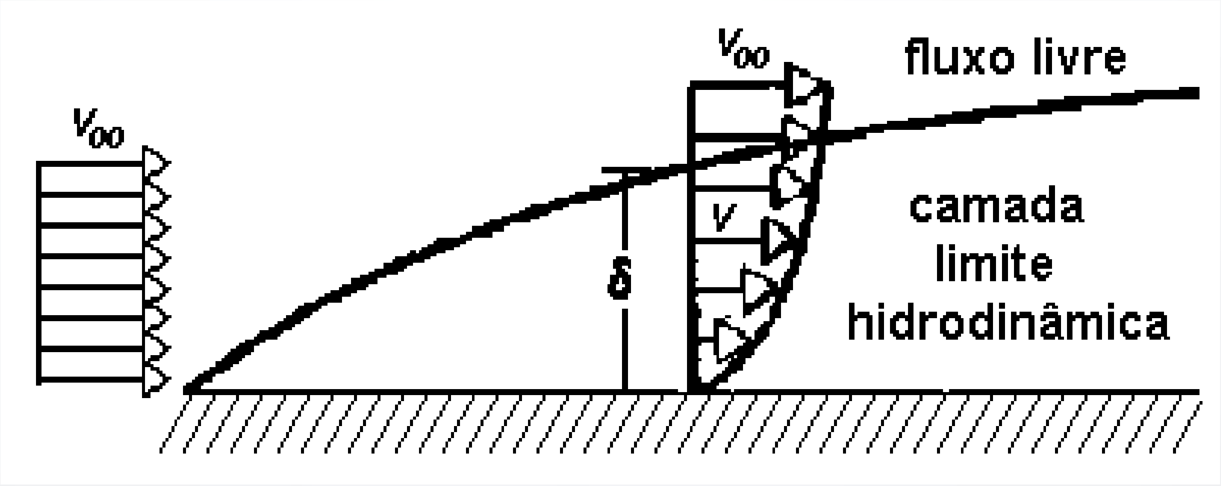


**Camada Limite:**

Quando um fluido escoa ao longo de uma superfície, seja o escoamento em regime <u>laminar</u> ou <u>turbulento</u>, as partículas na vizinhança da superfície são desaceleradas em virtude das forças viscosas.

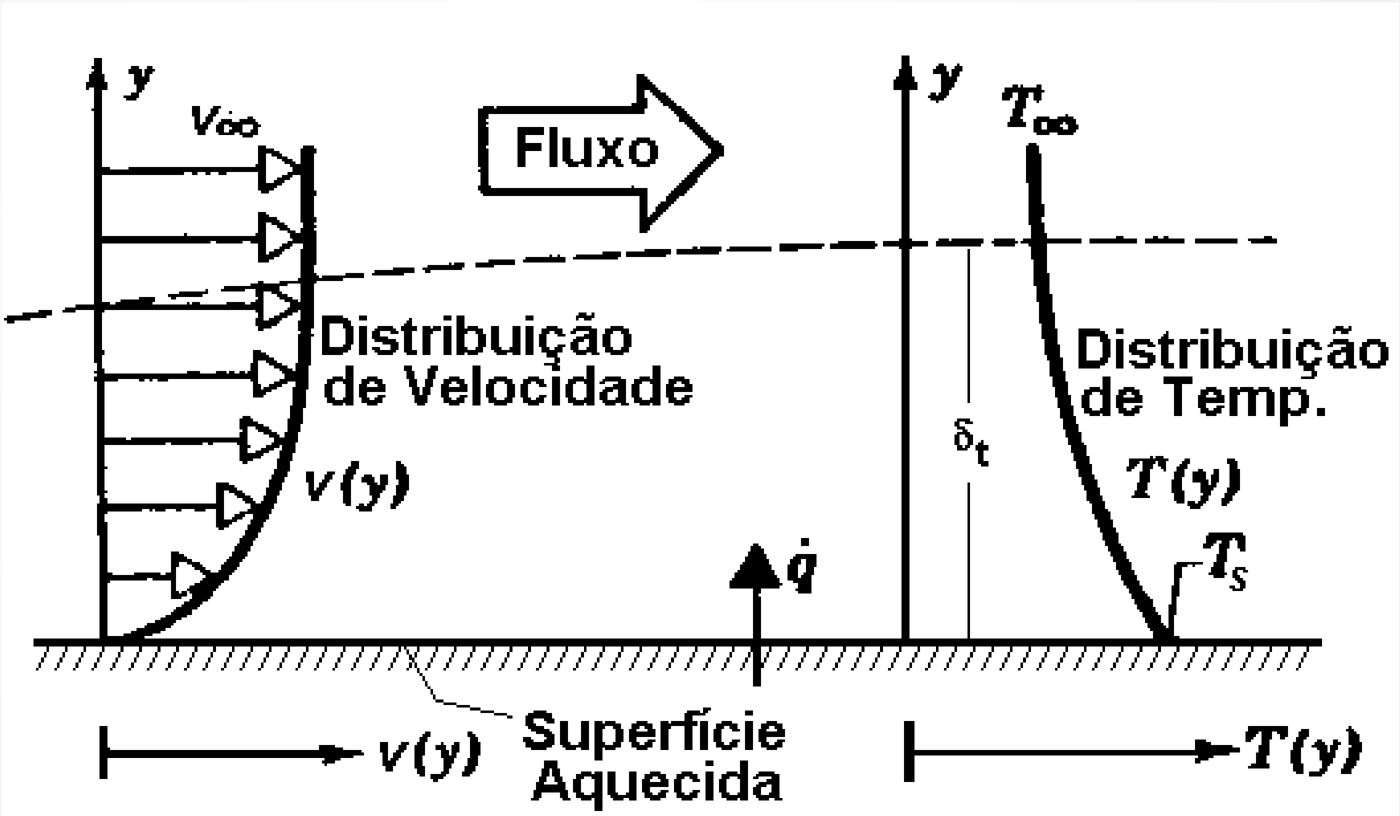
## Camada Limite:

A porção de fluido contida na região de variação substancial de velocidade, é denominada de camada limite hidrodinâmica.



## Camada Limite Térmica:

Consideremos agora o escoamento de um fluido ao longo de uma superfície quando existe uma diferença de temperatura entre o fluido e a superfície. Neste caso, O fluido contido na região de variação substancial de temperatura é chamado de camada limite térmica.



y
V∞
Fluxo
y
T∞
Distribuição
de Velocidade
Distribuição
de Temp.
δt
V(y)
T(y)
q̇
Ts
Superfície
Aquecida
V(y)
T(y)

O mecanismo da convecção pode então ser entendido como a ação combinada de condução de calor na região de baixa velocidade onde existe um gradiente de temperatura e movimento de mistura na região de alta velocidade. Portanto :

Região de baixa velocidade  a **condução** é mais importante.

Região de alta velocidade a **mistura** entre o fluido mais quente e o mais frio contribui substancialmente para a transferência de calor.

Na camada limite térmica tem-se portanto elevados gradientes de temperatura e pode-se dizer que o estudo do fenômeno da convecção se reduz ao estudo da condução através da mesma.

## Determinação do Coeficiente de Película(h):

O coeficiente h é uma função complexa de uma série de variáveis relacionadas com as seguintes características:

- Dimensão Característica ( D ): D: é a dimensão que domina o fenômeno da convecção. Ex: diâmetro de um tubo, altura de uma placa, etc

- Propriedades Físicas do Fluido ($\mu$, $\rho$, $C_p$, $k$, $\delta$ )

$\mu$ : viscosidade dinâmica do fluido;

$\rho$ : densidade do fluido;

$C_p$ : calor específico do fluido;

$k$ : condutividade térmica do fluido;

$\delta$ : coeficiente de expansão volumétrica

- Estado de Movimento do Fluido ( V,*g*,T )

V : velocidade do fluido;

*g* : aceleração da gravidade;

ΔT : diferença de temperatura entre a superfície e o fluido

Uma fórmula que levasse em conta todos estes parâmetros seria extremamente complexa. O problema é, então, contornado dividindo-se o estudo em casos particulares. Por exemplo, o estudo da convecção em gases pode ser subdividido assim :

$$\text{convecção em gases}\begin{cases} \text{natural}\begin{cases} \text{parede plana}\begin{cases} \text{horizontal} \\ \text{vertical} \end{cases} \\ \text{parede cilíndrica}\begin{cases} \text{horizontal} \\ \text{vertical}\begin{cases} \text{interna} \\ \text{externa} \end{cases} \end{cases} \end{cases} \\ \text{forçada}\{\text{etc} \end{cases}$$

Para cada caso particular são obtidas equações empíricas através da técnica de análise dimensional combinada com experiências, onde os coeficientes de película são calculados a partir de equações empíricas obtidas correlacionando-se os dados experimentais com o auxílio da análise dimensional.

Para **Convecção Forçada** a equação é do tipo :

$$Nu = \Phi(\mathrm{Re}, \mathrm{Pr})$$

**onde ,**

$$Nu = \frac{h.D}{k} \; ; \mathrm{Re} = \frac{D.V.\rho}{\mu} \; ; \mathrm{Pr} = \frac{c_p.\mu}{k}$$

Escoamento de um fluido no interior de um tubo de diâmetro D no regime de escoamento turbulento ( Re > 3300 ). Neste caso, usamos a seguinte equação :

$$Nu = 0{,}023.\mathrm{Re}^{0,8}.\mathrm{Pr}^{n}$$

**onde,**

$$n = 0{,}3\, p /\, fluido\ esfriando$$

$$n = 0{,}4\, p /\, fluido\ aquecendo$$

Convecção natural sobre placas verticais de altura D e cilindros de grande diâmetro e altura D ( p/ Gr.Pr < 108 ). Neste caso, usamos a seguinte equação:

$$Nu = 0{,}56(Gr.\mathrm{Pr})^{0{,}25}$$

Convecção natural sobre placas verticais de altura D e cilindros de grande diâmetro e altura D ( p/ Gr.Pr < 108 ). Neste caso, usamos a seguinte equação:

$$Nu = 0{,}56\left(Gr.\mathrm{Pr}\right)^{0{,}25}$$

## Transferência de Calor em Cilindros:

Envolve no escoamento externo o movimento do fluido na direção perpendicular ao eixo de um cilindro circular.

No ponto de estagnação ocorre uma elevação da temperatura, a pressão diminui com a elevação de x, a camada limite se desenvolve sobre pressão, na face posterior ocorre uma diminuição dessa pressão.

Diferente do escoamento em placas planas, nesse caso ocorre uma mudança na velocidade do escoamento. O numero de Reynolds para esse caso é:

$$\mathbf{Re_D} = \frac{\rho \, \mathbf{v} \, \mathbf{D}}{\mu} = \frac{\mathbf{v} \, \mathbf{D}}{\nu}$$

Camada limite laminar Re $\leq 2 \times 10^5$

Camada limite de transição Re $\geq 2 \times 10^5$

Foram usados métodos experimentais no sentido de determinar os efeitos da transferência de calor e de massa. No ponto de vista de cálculos de engenharia usa-se a correlação empírica de Hilpert.

$$\mathbf{Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,Re^m\,Pr^{\frac{1}{3}}}$$

Todas as propriedades devem ser estimadas na temperatura da película.(média)

| $Re_D$ | C | m |
|---|---|---|
| 0,4 –7 | 0,989 | 0,330 |
| 4 – 40 | 0,911 | 0,385 |
| 40 – 4.000 | 0,683 | 0,466 |
| 4.000 – 40.000 | 0,193 | 0,618 |
| 40.000 – 400.000 | 0,027 | 0,805 |

**1-** Fizeram-se experiências com um cilindro metálico com 12,7 mm de diâmetro e 94 mm de comprimento. O cilindro tem um aquecimento interno por um calefator elétrico, e está numa corrente transversal de ar, a baixa velocidade, num túnel de vento certa experiência, a velocidade da corrente de ar foi v = 10 m/s e a temperatura, 26,2 ºC.

Nestas condições, a medida da potencia dissipada no calefator foi P = 46 W, enquanto a temperatura superficial do cilindro se mantinha a $T_S$ = 128,4 ºC. Estimou-se em 15% a dissipação da potencia através dos efeitos acumulados da radiação da superfície e da condução pelas bases do cilindro.

Determinar o coeficiente da transferência convectiva de calor a partir das observações experimentais. E pela equação de Newton.

## Pela correlação de Hilpert

$$Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

Pela temperatura da película:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{10m/s\ x\,0{,}0127m}{20{,}92\ x\,10^{-6}\,m^2/s} = 6.070$$

## Pela correlação de Hilpert

Pr = 0,70 , pela tabela C = 0,193    m = 0,618

$$Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_D = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}} = (0{,}193)(6.070)^{0{,}618}(0{,}7)^{\frac{1}{3}} = 37{,}32$$

# Pela correlação de Hilpert

$$Nu_D = \frac{h\,D}{k} = \frac{37{,}3\, x 0{,}030 W / mK}{0{,}0127 m} = 88{,}1 W / m^2 K$$

Outras correlações podem ser usadas para cilindro circular, a correlação de Zhukauskas.

$$\mathbf{Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,Re^m\,Pr^n\left(\frac{Pr}{Pr_S}\right)^{\frac{1}{4}}}$$

Todas as propriedades são estimadas em $T_{00}$ exceto $Pr_s$ que é estimado em função do $T_s$.

$Pr > 10$, $n = 0{,}36$, se $Pr \leq 10$, $n = 0{,}37$

| $Re_D$ | C | m |
|---|---|---|
| 1 – 40 | 0,75 | 0,4 |
| 40 – 1000 | 0,51 | 0,5 |
| $10^3 – 2 \times 10^5$ | 0,26 | 0,6 |
| $2 \times 10^5 - 10^6$ | 0,076 | 0,7 |

Continuando o exercício, agora pela correlação de Zhukauskas.

$$\mathbf{Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,Re^{m}\,Pr^{n}\left(\frac{Pr}{Pr_S}\right)^{\frac{1}{4}}}$$

Todas as propriedades são a partir da $T_{00}$ exceto $Pr_S$

$$Re = \frac{v \; x \; D}{\upsilon} = \frac{10 \; m/s \; x \; 0{,}0127 \; m}{15{,}89 \; x \, 10^{-6} \, m^2/s} = 7.992{,}4$$

Da tabela: C = 0,26, m = 0,6   Pr  < 10, n = 0,37

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_S}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 0{,}26x\left(7992{,}4\right)^{0{,}6}\left(0{,}707\right)^{0{,}37}\left(\frac{0{,}707}{0{,}690}\right)^{\frac{1}{4}} =$$

$$Nu_D = 0{,}26x\,219{,}58x\,0{,}879x1{,}006 = 50{,}48$$

Da tabela: C = 0,26, m = 0,6   Pr  < 10, n = 0,37

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_S}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 0{,}26x\left(7992{,}4\right)^{0{,}6}\left(0{,}707\right)^{0{,}37}\left(\frac{0{,}707}{0{,}690}\right)^{\frac{1}{4}} =$$

$$Nu_D = 0{,}26x219{,}58x0{,}879x1{,}006 = 50{,}48$$

$$h = \frac{Nu \ x \ k}{D} = \frac{50,5 \ x \ 0,0263W / mK}{0,0127m} = 104,58W / m^2K$$

Churchill e Bernstein propuseram uma equação que cobre todo o intervalo de $Re_D$ para o qual se conhecem dados experimentais, e também cobre o intervalo de Pr. Esta equação deve ser usada quando $Re_D$ Pr > 0,2. Todas as propriedades devem ser estimadas na temperatura da película.(média)

$$\mathbf{Nu_D = 0{,}3 + \left[ \frac{0{,}62\,Re^{\frac{1}{2}}\,Pr^{\frac{1}{3}}}{\left[1+\left(\frac{0{,}4}{Pr}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \right] \left[1+\left(\frac{Re}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}}$$

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{10m/s\ x\,0{,}0127m}{20{,}92\ x\,10^{-6}\,m^2/s} = 6.070$$

$$Nu_D = 0{,}3 + \left[ \frac{0{,}62 \left(6071\right)^{\frac{1}{2}} 0{,}7^{\frac{1}{3}}}{\left[ 1 + \left( \frac{0{,}4}{0{,}7} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{4}}} \right] \left[ 1 + \left( \frac{6071}{282.000} \right)^{\frac{5}{8}} \right]^{\frac{4}{5}} = 40{,}6$$

$$h = \frac{Nu \ x \ k}{D} = \frac{40{,}6 \ x \ 0{,}030W / mK}{0{,}0127m} = 95{,}9W / m^2K$$

Calculo pela equação de Newton:

$$h = \frac{q}{A\left(T_s - T_{00}\right)}$$

$$q = 0,85\ x\ P = 0,85 x 46 = 39,1W$$

$$A = \pi \ x \ D \, x \, L = \pi \, x \, 0{,}0127m \, x \, 0{,}094 = 0{,}00375m^2$$

Calculo pela equação de Newton:

$$h = \frac{39{,}1W}{0{,}00375m^2 \left(128{,}4 - 26{,}2\right)K} = 102W / m^2K$$

**2)** O ar atmosférico a $T_{00}$ = 250 K, com velocidade de corrente livre v = 30 m/s flui transversalmente a um cilindro circular, de diâmetro D = 2,5 cm. A superfície do cilindro é mantida a uma temperatura uniforme $T_S$ = 350 K.

Pede-se :Calcule o coeficiente de transferência de calor médio. Determine a taxa de transferência de calor, por metro de comprimento do cilindro.

Dados da tabela:

$T_m = 300\ K$

$v = 15{,}89 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$k = 26{,}3 \times 10^{-3}\ W / m\ K$

$Pr = 0{,}707$

$T_{00} = 250\ K$

$v = 11{,}44 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$k = 22{,}3 \times 10^{-3}\ W / m\ K$

$Pr = 0{,}720$

$T_{S} = 350\ K$

$Pr = 0{,}700$

# Pela correlação de Zhukauskas:

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \quad \frac{30m/s\ x\,0{,}025m}{11{,}44\ x\,10^{-6}\,m^2/s} = 65.559{,}9$$

$$Nu_D = 0{,}26(65.559)^{0{,}6}\ (0{,}720)^{0{,}37}\left(\frac{0{,}720}{0{,}700}\right)^{\frac{1}{4}} = 179{,}98$$

Pela correlação de Zhukauskas:

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{179{,}98\ x\,22{,}3x10^{-3} W / mK}{0{,}025m} = 160{,}54W / m^2 K$$

$$q = hA(T_s - T_{00}) = 160{,}54W / m^2 K\ \ x\left(\pi\ 0{,}025m\ L\right)(350 - 250) = 1260{,}87W / m$$

# Pela relação de Churchill

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \quad \frac{30m/s\ x\,0{,}025m}{15{,}89\ x\,10^{-6}\,m^2\,/\,s} = 47.199{,}49$$

# Pela relação de Churchill

$$\mathrm{Nu_D} = 0{,}3 + \left[\frac{0{,}62\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}}\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}}{\left[1+\left(\frac{0{,}4}{\mathrm{Pr}}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}}\right]\left[1+\left(\frac{\mathrm{Re}}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}}$$

# Pela relação de Churchill

$$Nu_D = 0,3 + \left[ \frac{0,62(47.199,5)^{\frac{1}{2}} \, 0,707^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{0,707}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}} \right] \left[1 + \left(\frac{(47.199,5)}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} = 131,95$$

# Pela correlação de Churchill

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{131{,}95\ x\,26{,}3x10^{-3}W\,/\,mK}{0{,}025m} = 138{,}81W\,/\,m^2K$$

$$q = hA(T_s - T_{00}) = 138{,}81W\,/\,m^2K\ x\left(\pi\ 0{,}025m\ L\right)(350-250) = 1090{,}2W\,/\,m$$

## Pela relação de Hilpert

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{30m/s\ x\,0{,}025m}{15{,}89\ x\,10^{-6}\,m^2/s} = 47.199{,}49$$

# Pela relação de Hilpert

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \quad \frac{30m/s\ x\,0{,}025m}{15{,}89\ x\,10^{-6}\,m^2\ /\,s} = 47.199{,}49$$

$$Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_D = 0{,}027\left(47.199{,}49\right)^{0{,}805} 0{,}707^{\frac{1}{3}} = 139{,}21$$

# Pela relação de Hilpert

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{139,21\,x\,26,3x10^{-3}W/mK}{0,025m} = 146,45\,W/m^2K$$

$$q = hA(T_s - T_{00}) = 146,45W/m^2K\ x\left(\pi\ 0,025m\ L\right)(350 - 250) = 1150,25W/m$$

3) O ar atmosférico a uma temperatura de 300 K com velocidade de 25 m/s passa através de um tubo de diâmetro de 5 cm que se encontra a uma temperatura 227 ºC. Calcule a taxa de transferência de calor na correlação adequada por comprimento de cilindro

$\mathbf{T_{00} = 300\ K}$

Dados da tabela A-4

$\rho = 1{,}1614\ kg/m^3$

cp = 1,007 kj/ kg.K

$\mu = 184{,}6 \times 10^{-7}\ N \cdot s/m^2$

$v = 15{,}89 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$k = 26{,}3\ 10^{-3}\ W/m\ K$

Pr = 0,707

**$T_S$ = 500 K**

Pr = 0,694

**$T_f$ = 400 K**

v = $26,41 \times 10^{-6}$ $m^2/s$

k = $33,8 \times 10^{-3}$ W / m K

Pr = 0,690

# Pela relação de Zhukauskas

$$\mathrm{Re} = \frac{v\ x\ D}{\upsilon} = \frac{25\ m/s\ x\ 0{,}05\ m}{15{,}89\ \mathrm{x}\ 10^{-6}\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}m^2\ /\ s} = 78.665{,}8$$

$$Nu_D = \frac{h\,D}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^n\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_S}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 0{,}26x\left(78665{,}8\right)^{0,6}\left(0{,}707\right)^{0,37}\left(\frac{0{,}707}{0{,}684}\right)^{\frac{1}{4}} = 198{,}95$$

$$h = \frac{Nu\ x\ k}{D} = \frac{198{,}95\ x\ 26{,}3\ \ x10^{-3}\ W/mK}{0{,}05m} = 104{,}64\, W/m^2 K$$

$$q = h\ A\,\Delta T = 104{,}64\, W/m^2 K\ \ x\left(\pi\ x\ 0{,}05\ x\ L\right)\left(500 - 300\right) = 3.287{,}4\, W/m$$

# Pela relação de Churchill

$$\mathrm{Re} = \frac{v\ x\ D}{\upsilon} = \frac{25\ m/s\ x\ 0{,}05\ m}{26{,}41\,\mathrm{x}\,10^{-6}\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}m^2\ /\ s} = 47.330{,}5$$

$$Nu_D = 0{,}3 + \left[\frac{0{,}62\,(47.330{,}5)^{\frac{1}{2}}\,0{,}690^{\frac{1}{3}}}{\left[1+\left(\frac{0{,}4}{0{,}690}\right)^{\frac{2}{3}}\right]^{\frac{1}{4}}}\right]\left[1+\left(\frac{47.330{,}5}{282.000}\right)^{\frac{5}{8}}\right]^{\frac{4}{5}} =$$

# Pela relação de Churchill

$$Nu_D = 0,3 + \left[\frac{119,19}{1,141}\right] 1,25 = 130,87$$

$$h = \frac{Nu\ x\ k}{D} = \frac{130,87\ x\ 33,8x10^{-3}\ W/mK}{0,05m} = 88,47\ W/m^2K$$

$$q = h\ A\ \Delta T = 88,47\ W/m^2K\ x\left(\pi\ x\ 0,05\ x\ L\right)\left(500 - 300\right) = 2.779,4\ W/m$$

# Pela correlação de Hilpert

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$\mathrm{Re} = \frac{v\ x\ D}{\upsilon} = \frac{25\ m/s\ x\ 0{,}05\ m}{26{,}41\,\mathrm{x}\,10^{-6}\ \mathrm{m}^2/\mathrm{s}m^2\ /\ s} = 47.330{,}5$$

$$Nu_D = \frac{hD}{k} = 0{,}027\left(47.330{,}5\right)^{0{,}805} 0{,}690^{\frac{1}{3}} = 138{,}4$$

# Pela correlação de Hilpert

$$h = \frac{Nu \ x \ k}{D} = \frac{138{,}4 \ x \ 33{,}8x10^{-3} \ W/mK}{0{,}05m} = 93{,}56 \, W/m^2K$$

$$q = h \ A \ \Delta T = 93{,}56 \, W/m^2K \ x\left(\pi \ x \ 0{,}05 \ x \ L\right)\left(500 - 300\right) = 2.939{,}3 \, W/m$$

## Transferência de Calor em Esferas:

Os efeitos da camada limite associados ao escoamento sobre uma esfera são muito parecidos com os efeitos do cilindro circular. Algumas correlações foram propostas para esses cálculos, dentre elas existe a de Whitaker.

$$Nu_D = 2 + \left( 0{,}4\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} + 0{,}06\,\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}} \right) \mathrm{Pr}^{0,4} \left( \frac{\mu}{\mu_S} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$0,71 < Pr < 380$

$3,5 < ReD < 7,6 \times 10^4$

$1,0 < (\mu / \mu S) < 3,2$

todas as propriedades são estimadas em $T_{00}$, exceto $\mu_S$

**1-** O ar atmosférico, a $T_{00}$ = 450 K e a velocidade da corrente livre v = 30 m/s, flui em torno de uma esfera de diâmetro D = 2,5 cm. A superfície da esfera é mantida à temperatura uniforme $T_S$ = 600 K, por aquecimento elétrico. Pede-se: o coeficiente médio de transferência de calor e a taxa de transferência de calor.

**$T_{00}$ = 450 K**

$v = 32{,}39 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$k = 37{,}3 \times 10^{-3}\ W / m\ K$

Pr = 0,686

$\mu = 250{,}7 \times 10^{-7}\ N\ s/m^2$

$\rho = 0{,}7740\ kg/m^3$

**$T_S$ = 600 K**

$\mu = 305{,}8 \times 10^{-7}\ N\ s/m^2$

$$Nu_D = 2 + \left( 0{,}4\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} + 0{,}06\,\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}} \right) \mathrm{Pr}^{0,4} \left( \frac{\mu}{\mu_S} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{30m/s\ x\,0{,}025m}{32{,}39x10^{-6}\,m^2} = 23.155$$

$$Nu_D = 2 + \left( 0,4(23.155)^{\frac{1}{2}} + 0,06(23.155)^{\frac{2}{3}} \right) 0,686^{0,4} \left( \frac{250,7x10^{-7}}{305,8x10^{-7}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + (60,87 + 48,74) 0,686^{0,4} (951,54x10^{-3}) =$$

$$Nu_D = 91,70$$

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{91{,}70\ x\,37{,}3x10^{-3}W/mK}{0{,}025m} = 136{,}82$$

$$q = hA\Delta T$$

$$q = 136{,}82W/m^2K\ x\,4\pi(0{,}0125m)^2(150K) = 40{,}11W$$

**2-** A película plástica decorativa sobre uma esfera de cobre com 10 mm de diâmetro é curada em um forno a 75 ºC. Após ser retirada do forno, a esfera é submetida a uma corrente de ar com velocidade de 10 m/s a uma pressão de 1 atm e uma temperatura de 23 ºC. Calcule o fluxo de calor deste sistema.

**$T_{00}$=296 = 300K**

$\upsilon = 15{,}89 \times 10^{-6}\ m^2/s$

$k = 26{,}3 \times 10^{-3}\ W/mK$

$\mu = 184{,}6 \times 10^{-7}\ Ns/m^2$

Pr=0,707

**$T_S$=348 = 350K**

$\mu = 208{,}2 \times 10^{-7}\ Ns/m^2$

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{10m/s\ x\ 10x10^{-3}m}{15{,}89x10^{-6}m^2} = 6.293$$

$$Nu_D = 2 + \left(0{,}4\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} + 0{,}06\,\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}\right)\mathrm{Pr}^{0,4}\left(\frac{\mu}{\mu_S}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + \left(0{,}4(6.293)^{\frac{1}{2}} + 0{,}06(6.293)^{\frac{2}{3}}\right)0{,}707^{0,4}\left(\frac{184{,}6x10^{-7}}{208{,}2x10^{-7}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + (31{,}73 + 20{,}45)0{,}860(970{,}37x10^{-3}) = 45{,}54$$

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{45{,}54\ x\,26{,}3x10^{-3}W\,/\,mK}{10x10^{-3}\,m} = 119{,}77$$

$$q = hA\Delta T$$

$$q = 119{,}77W\,/\,m^2K\ \,x\,4\,\pi\,(5x10^{-3}m)^2(52K) = 1{,}95W$$

**3-** O ar atmosférico, a uma velocidade de v = 50 m/s e temperatura de 300 K passa por uma esfera de D= 5 cm, cuja temperatura está a 500 K, pede-se o fluxo de calor deste sistema.

$$\mathrm{Re}_D = \frac{v\,D}{\nu} = \frac{50m/s\ x\ 50x10^{-3}\,m}{15,89x10^{-6}\,m^2} = 157.331$$

$$Nu_D = 2 + \left(0,4\,\mathrm{Re}^{\frac{1}{2}} + 0,06\,\mathrm{Re}^{\frac{2}{3}}\right)\mathrm{Pr}^{0,4}\left(\frac{\mu}{\mu_S}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + \left(0,4(157.331)^{\frac{1}{2}} + 0,06(157.331)^{\frac{2}{3}}\right)0,707^{0,4}\left(\frac{184,6x10^{-7}}{270,1x10^{-7}}\right)^{\frac{1}{4}}$$

$$Nu_D = 2 + \left(158,65 + 174,86\right)0,860(926,33x10^{-3}) = 265,98$$

$$h = \frac{Nu\,k}{D} = \frac{267,68\;x\,26,3x10^{-3}W/mK}{50x10^{-3}m} = 139,79$$

$$q = hA\Delta T$$

$$q = 140,79W/m^2K\;x\,4\,\pi\,(25x10^{-3}m)^2(200K) = 219,58W$$