

# **Aula de Exercícios**

## **Transferência de Calor em Escoamentos Externos**

# Cálculo da Taxa de Calor

**Cálcula Nu, correlações**

$$\text{Nu} = h.L/k$$

**Cálcula h**

$$h = \text{Nu}.k/L$$

**Calcula fluxo calor  $q''$**

$$q'' = h.(T_p - T_\infty)$$

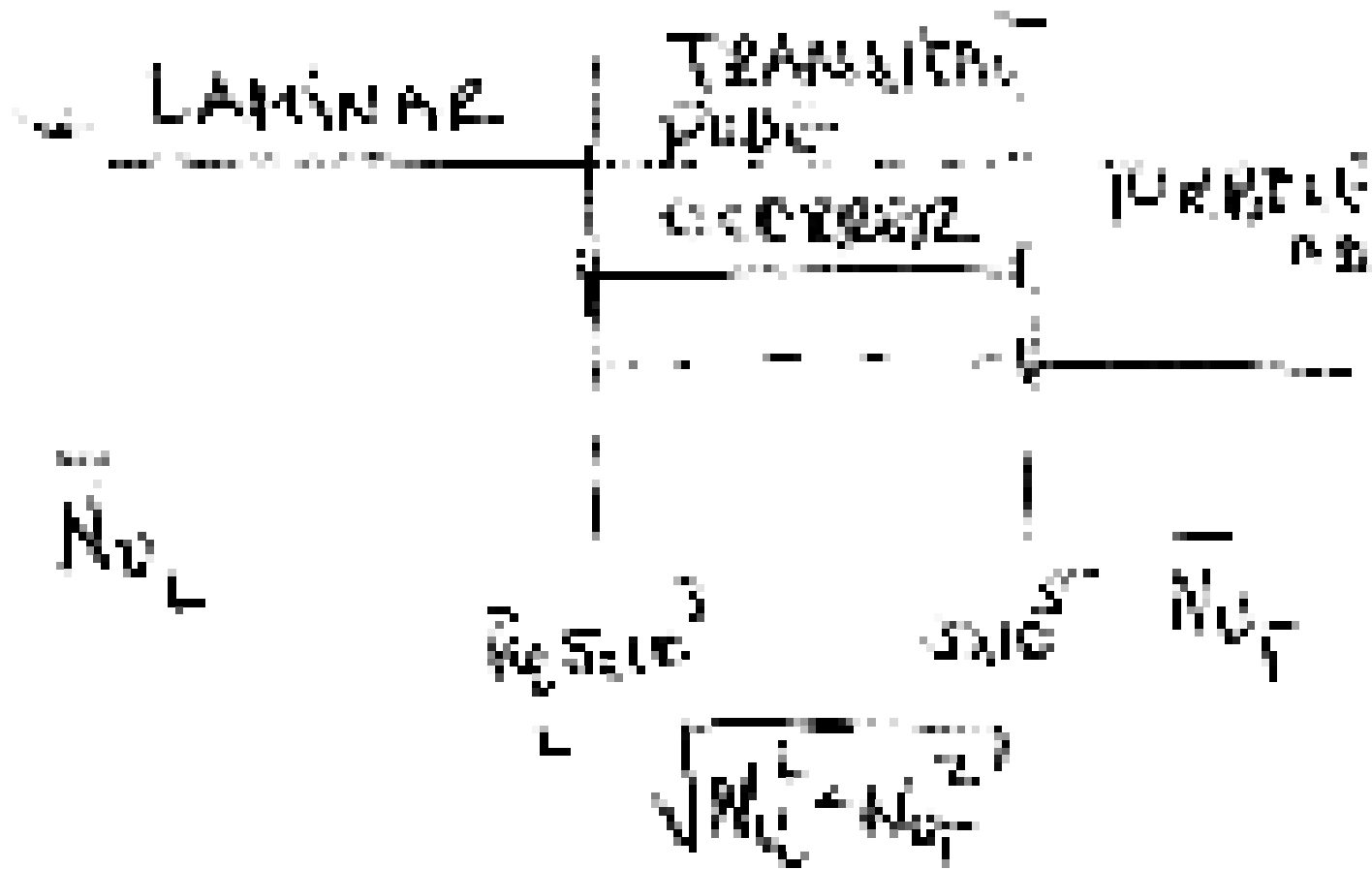
**Calcula taxa de calor Q**

$$Q = q'' . A$$

A dimensão linear L deve ser calculada para cada caso em particular.

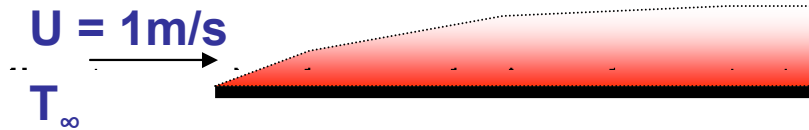
- *Em convecção forçada e placa plana L é o comprimento da placa.*
- *Cilindros e esferas possuem comprimentos fornecidos por tabelas.*
- *Em convecção natural L também pode variar.*

# Transição Conv. Forçada Placa Plana



**6-22** Um fluido escoar sobre uma placa plana isotérmica. O comprimento da placa é ajustado de forma que o número de Reynolds na extremidade final seja  $5 \times 10^3$  e a velocidade do fluido 1 m/s. Determine a espessura das camadas limites hidrodinâmica e térmica se o fluido for

- (a) Ar a 20 °C.
- (b) Água a 50 °C.
- (c) Óleo a 140 °C.



$$\text{Re}_x = 5000$$

$$\delta_h = ?$$

$$\delta_T = ?$$

### PROPRIEDADES

	$\nu$	Pr	$L = \text{Re} \cdot \nu / U$
	m <sup>2</sup> /s	(---)	m
ar	1.51E-05	0.713	0.075
água	5.54E-07	3.57	0.00277
óleo	1.06E-05	125	0.053

$$\text{Tab. 6-1} \rightarrow \frac{\delta_h}{L} = \frac{5}{\sqrt{\text{Re}_L}}$$

$$\text{Eq. 6-18} \rightarrow \frac{\delta_h}{\delta_T} = 1.026 \cdot \text{Pr}^{1/3}$$

	<b>L</b> <b>m</b>	<b>Pr</b>	<b>δh</b> <b>mm</b>	<b>δT</b> <b>mm</b>
<b>ar</b>	<b>0.075</b>	<b>0.71</b>	<b>5.3</b>	<b>5.8</b>
<b>água</b>	<b>0.003</b>	<b>3.57</b>	<b>0.2</b>	<b>0.1</b>
<b>óleo</b>	<b>0.053</b>	<b>125</b>	<b>3.7</b>	<b>0.7</b>

**6-24** Água na velocidade de 5 m/s escoia sobre uma placa plana isotérmica horizontal de 20 cm de comprimento. A temperatura da água é 30 °C enquanto que a da superfície da placa é 60 °C. Calcule a taxa de transferência de calor por unidade de largura para a superfície superior da placa.

Propriedades água  
@ 30°C - Tab. A-9

$$C_p = 4180 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 995.7 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 0.7978 \cdot 10^{-3} \text{ m/s/kg}$$

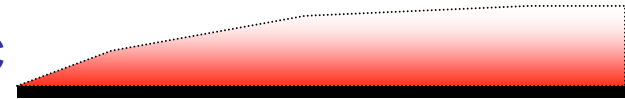
$$\nu = 0.8012 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k = 0.6150 \text{ W/m}^\circ\text{C}$$

$$Pr = 5.42$$

$$U = 5 \text{ m/s}$$

$$T_\infty = 30^\circ\text{C}$$



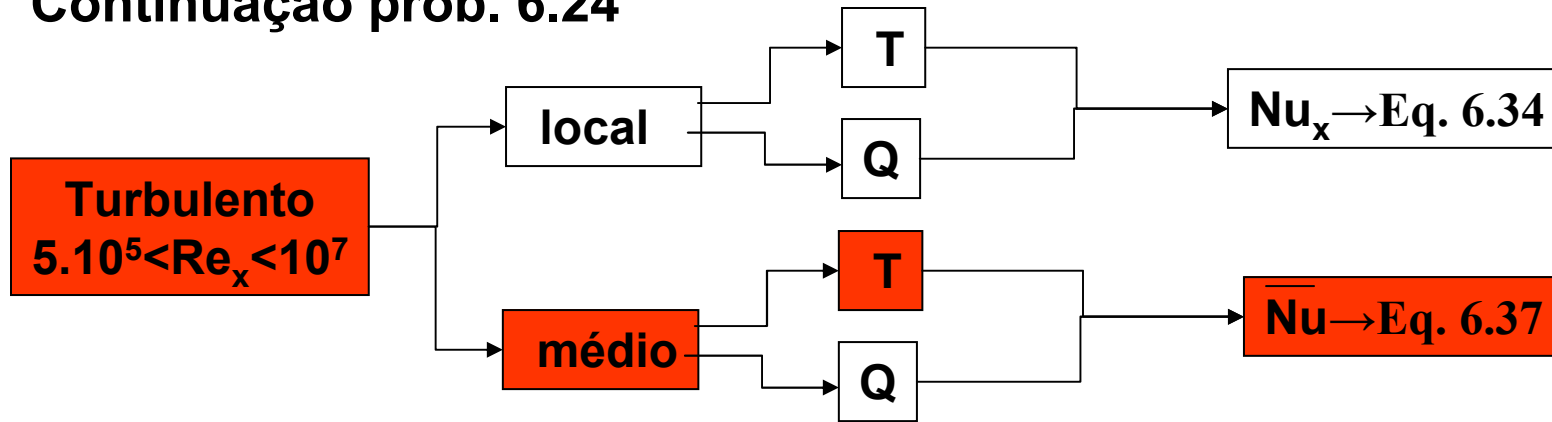
$$T_p = 60^\circ\text{C}$$

$$Q = ?$$

$$\text{Cálculo do } Re_L = U \cdot L / \nu = 5 \times 0.2 / 0.8012 \cdot 10^{-6} = 1.25 \times 10^6$$

**Regime:  
Turbulento  
 $5 \cdot 10^5 < Re_L < 10^7$**

## Continuação prob. 6.24

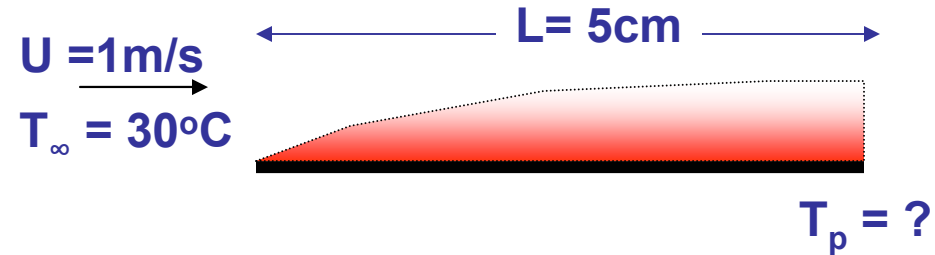


$$\text{Eq. 6-37} \rightarrow \overline{\text{Nu}}_T = \frac{0.037 \cdot \text{Re}_L^{0.8} \cdot \text{Pr}}{1 + 2.443 \cdot \text{Re}_L^{-0.1} \cdot (\text{Pr}^{2/3} - 1)} = 6720$$

$$h = \frac{k}{L} \cdot \text{Nu} = 20658 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{\dot{Q}}{b} = L \cdot h \cdot (T_p - T_\infty) = 124 \text{ kW/m}$$

**6-27** Água escoia sobre uma placa plana eletricamente aquecida, de 5 cm de comprimento, a uma velocidade de 1 m/s. A água está na temperatura de 30 °C e a condição de contorno térmica na placa é a de fluxo de calor constante de 10 kW/m<sup>2</sup>. Estime a temperatura da superfície da placa na extremidade final.

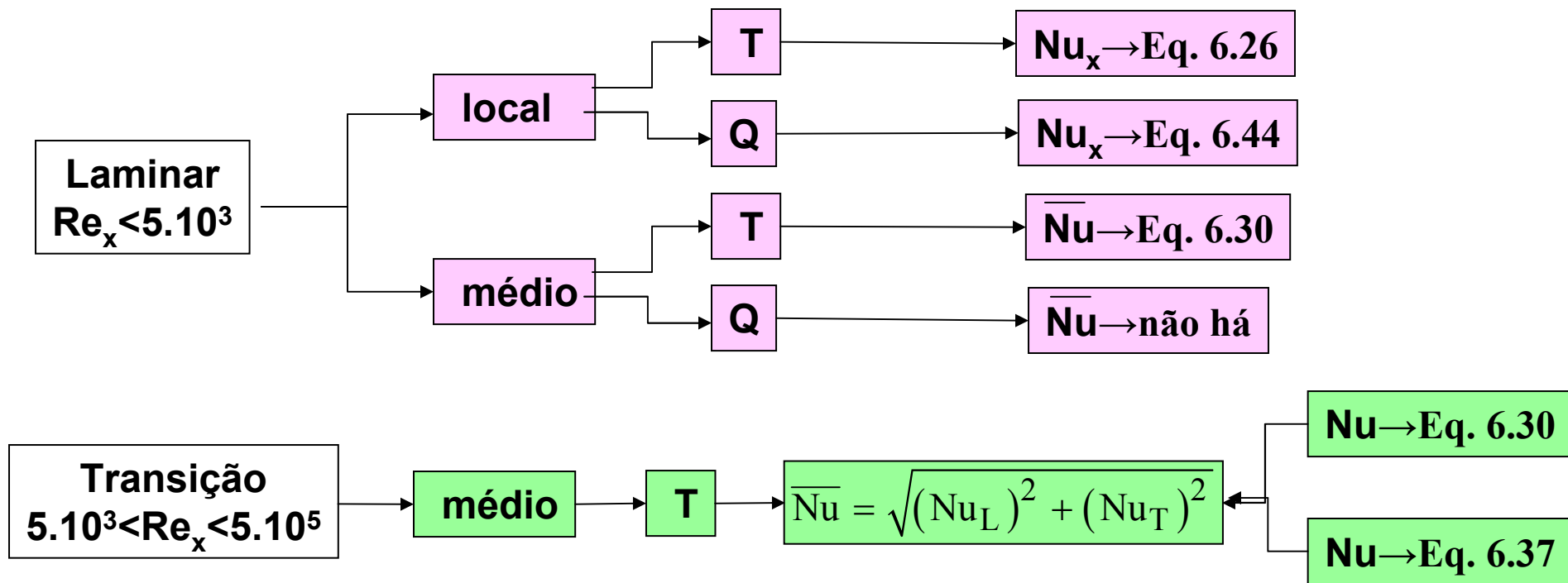


Propriedades água  
 $T_{\infty} = 30^{\circ}\text{C}$  - Tab. A-9

$C_p = 4180 \quad \text{J/kg}^{\circ}\text{C}$   
 $\rho = 995.7 \quad \text{kg/m}^3$   
 $\mu = 79.78 \cdot 10^{-5} \quad \text{kg/m/s}$   
 $\nu = 0.80 \cdot 10^{-6} \quad \text{m}^2/\text{s}$   
 $k = 61.5 \cdot 10^{-2} \quad \text{W/m}^{\circ}\text{C}$   
 $Pr = 5.42$   
 $\beta = 0.306 \quad 1/\text{K}$

$$Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu} = 6.24 \cdot 10^4 \rightarrow \text{Transição}$$





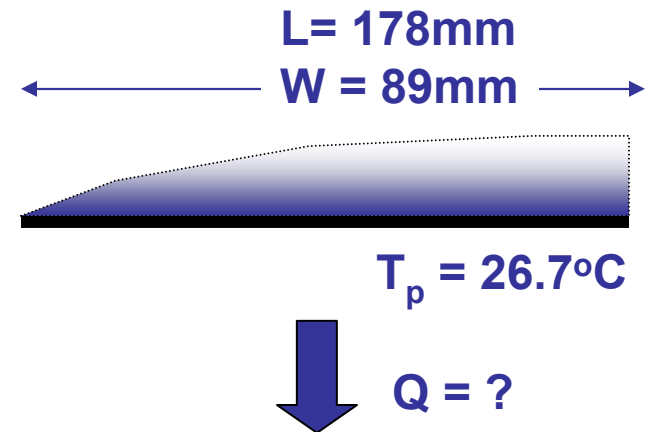
**Comentário: problema mal formulado! O  $Re_x$  encontrado informa que o regime em  $x = 5\text{cm}$  da borda de ataque é transição. Entretanto não há correlação para  $Nu_x$  na transição!**

**6-29E** Considere que a mão estendida de uma pessoa seja equivalente a uma placa plana com temperatura de superfície de  $80^\circ\text{F}$ . A mão tem 3,5 in. de largura e 7,0 in. de comprimento com área total de  $49\text{ in}^2$ . A mão está estendida paralelamente à direção do escoamento e o fluido escoava através da largura da mão (ângulo de incidência nulo). Determine a taxa de transferência de calor quando:

- (a) A mão é mantida fora da janela de um carro movendo-se a 20 mph através de ar a  $20^\circ\text{F}$ .
- (b) A mão é mantida numa corrente de montanha com velocidade de 6 in./s na temperatura de  $50^\circ\text{F}$ .

*O corpo não sente a 'temperatura' mas o fluxo de calor, somos homotérmicos. 'Wind chill effect'  
Obs.: os dados do problema foram 'invertidos'*

- a)  $U = 8.9\text{ m/s}$  &  $T_\infty = +10^\circ\text{C}$
- b)  $U = 0.15\text{ m/s}$  &  $T_\infty = -10^\circ\text{C}$



Propriedades ar  
@ 10°C - Tab. A-8

$$\begin{aligned}C_p &= 1005.8 \\ \rho &= 1.2467 \\ \mu &= 17.69 \cdot 10^{-6} \\ \nu &= 14.19 \cdot 10^{-6} \\ k &= 24.87 \cdot 10^{-3} \\ Pr &= 0.716\end{aligned}$$

**CASO (a)**

$$Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu} = 1.12 \cdot 10^5 \rightarrow \text{Transição}$$

Transição  
 $5 \cdot 10^3 < Re_x < 5 \cdot 10^5$

médio

T

$$\overline{Nu} = \sqrt{(Nu_L)^2 + (Nu_T)^2}$$

Nu → Eq. 6.30

Nu → Eq. 6.37

$$\overline{Nu}_L = 0.664 \cdot (Re_L)^{1/2} \cdot Pr^{1/3} = 198.5$$

$$\overline{Nu}_T = \frac{0.037 \cdot Re_L^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_L^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} = 341.4$$

$$\overline{Nu} = 394.9$$

$$h = 55.17 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

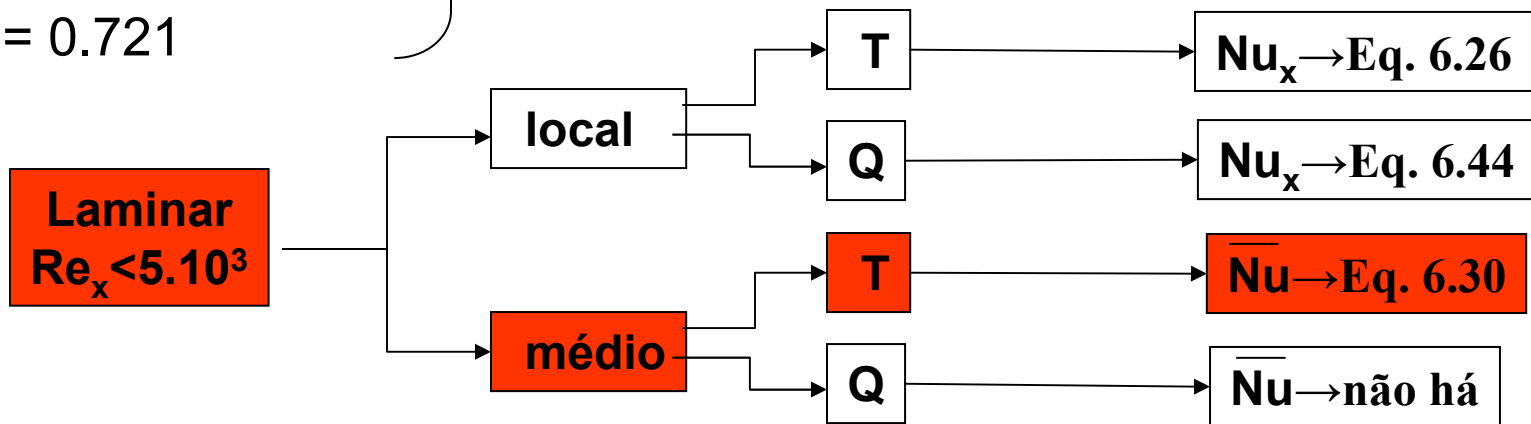
$$\dot{q}'' = 921 \text{ W/m}^2$$

Propriedades ar  
@ -10°C - Tab. A-8

$C_p = 1005.6$   
 $\rho = 1.3414$   
 $\mu = 16.71 \cdot 10^{-6}$   
 $\nu = 12.46 \cdot 10^{-6}$   
 $k = 23.29 \cdot 10^{-3}$   
 $Pr = 0.721$

## CASO (b)

$$Re_L = \frac{U \cdot L}{\nu} = 2.14 \cdot 10^3 \rightarrow \text{La min ar}$$



$$\overline{Nu}_L = 0.664 \cdot (Re_L)^{1/2} \cdot Pr^{1/3} = 27.6$$

$$\overline{Nu} = 27.6$$

$$h = 2.2 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{q}'' = 81 \text{ W/m}^2$$

- **Conclusão:**
- **A taxa de remoção de calor no caso (a) é cerca de 11 vezes maior que o caso (b).**
- **Você vai sentir menos frio na mão se andar a 0.5 km/h quando a temperatura for  $-10^{\circ}\text{C}$  do que se andar a 32 km/h se a temperatura for  $+10^{\circ}\text{C}$ !**
- **Wind chill effect – é a temperatura equivalente (bem menor) tal que taxa de remoção do calor é equivalente àquela que ela experimenta no ambiente com vento!**

**6.33** Um elemento aquecido estreito na forma de uma fita está colocado numa corrente de ar que se move na velocidade de 8 m/s e tem temperatura de 10°C. A fita, que é um componente de aquecedor de ar, está orientada paralelamente à corrente de ar como mostra a Fig. A temperatura máxima da superfície da fita em operação contínua é de 150°C. Estime o fluxo de transferência de calor em  $x = 1\text{ cm}$ .

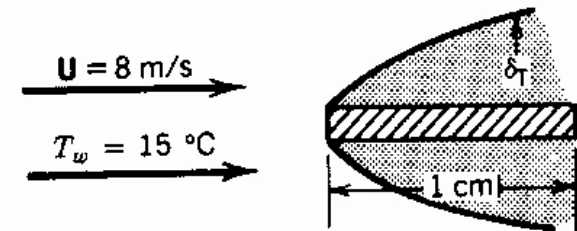


Figura P6-33 Elemento de aquecimento em forma de fita.

Propriedades ar  
@ 10°C - Tab. A-8

$$C_p = 1005.8$$

$$\rho = 1.2467$$

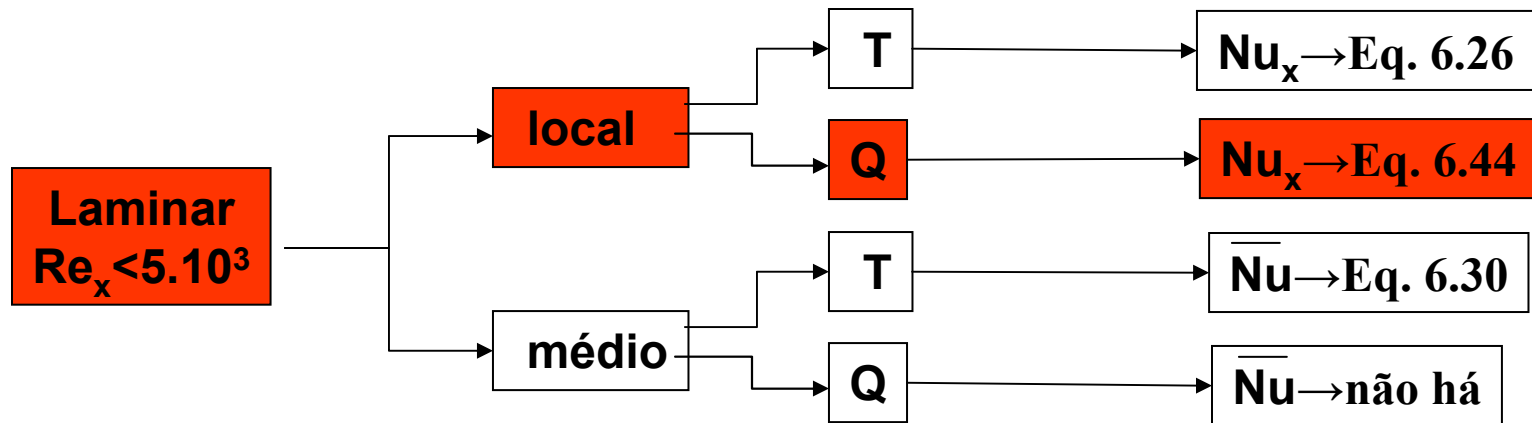
$$\mu = 17.69 \cdot 10^{-6}$$

$$\nu = 14.19 \cdot 10^{-6}$$

$$k = 24.87 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Pr} = 0.716$$

$$\text{Re}_L = \frac{U \cdot L}{\nu} = 5.64 \cdot 10^3 \rightarrow \text{'Laminar'}$$



A máxima temperatura ocorrerá em  $x = 1\text{cm}$ !

$$\overline{\text{Nu}}_x = 0.46 \cdot (\text{Re}_x)^{1/2} \cdot \text{Pr}^{1/3} = 30.9$$

$$\overline{\text{Nu}} = 30.9$$

$$h = 83.1 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{q}'' = 11635 \text{ W/m}^2$$

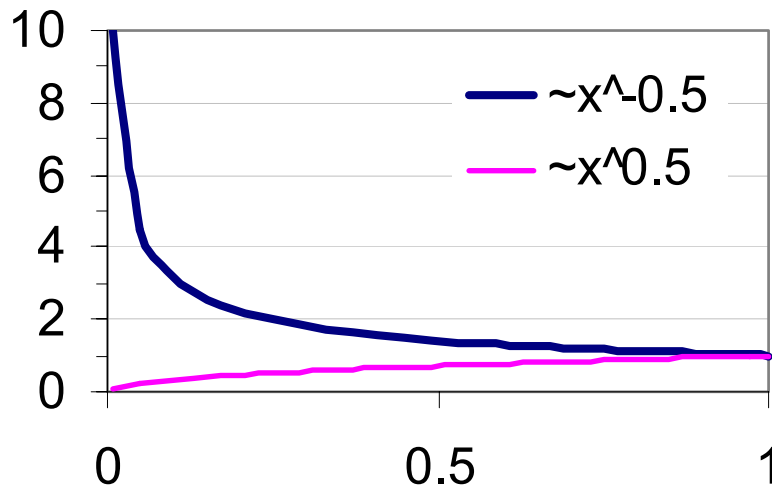
# Como varia a temperatura na placa?

- Para escoamento laminar a Eq. 6.44 mostra que:

$$h \sim 1/\sqrt{x}$$

- Como  $q''$  é constante, então:

$$(T_p - T_\infty) = \frac{\dot{q}''}{h} \sim \sqrt{x}$$



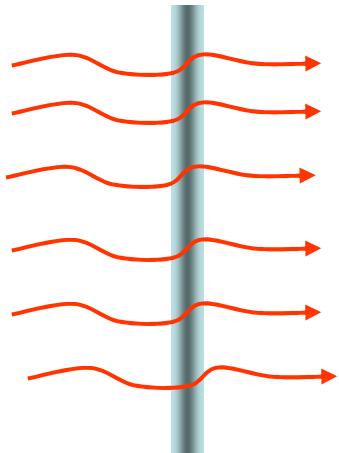
Note que:

1. A diferença de temperatura é zero em  $x = 0$ ,
2. O coeficiente de transferência de calor,  $h \rightarrow \infty$  em  $x = 0$
3. O fluxo de calor é constante para qualquer  $x$ !



**6.35** Um aquecedor de cabelos a ar é composto de um elemento de aquecimento elétrico contendo um fio de 0,5 mm de diâmetro. O ar move-se sobre o elemento aquecido a uma velocidade de 35 m/s. Estime o coeficiente de transferência de calor por convecção para a transferência de calor entre o fio e o ar em  $W/m^2K$ . As propriedades termofísicas do ar devem ser avaliadas a  $50^\circ C$ .

**U = 35 m/s**



Propriedades ar  
@  $50^\circ C$  - Tab. A-8

$$C_p = 1007.4$$

$$\rho = 1.0924$$

$$\mu = 19.57 \cdot 10^{-6}$$

$$\nu = 17.92 \cdot 10^{-6}$$

$$k = 27.81 \cdot 10^{-3}$$

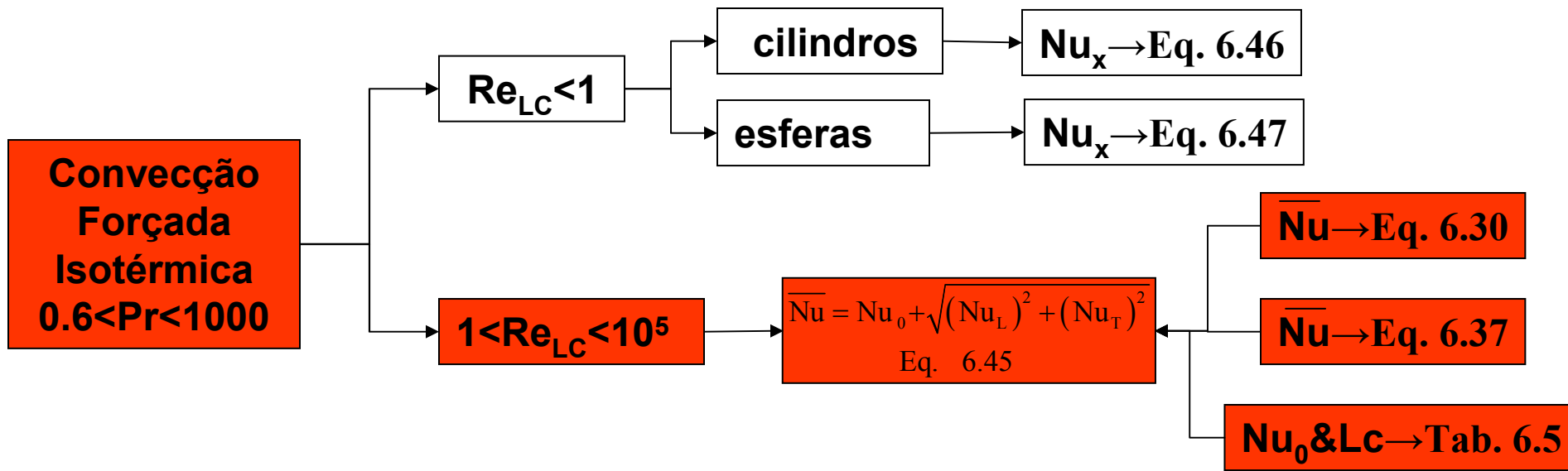
$$Pr = 0.709$$

**Tabela 6-5** Coeficientes e comprimentos característicos para vários objetos para convecção forçada, eq. 6-45\*

Objeto	$L_c$	$\overline{Nu}_0$
Fio, cilindro e tubos	$\pi d/2$	0,3
Esferas	$d$	2,0

$$L_c = (\pi d/2) \quad \overline{Nu}_0 = 0.3$$

$$Re_L = \frac{U \cdot L_c}{\nu} = 15.33$$



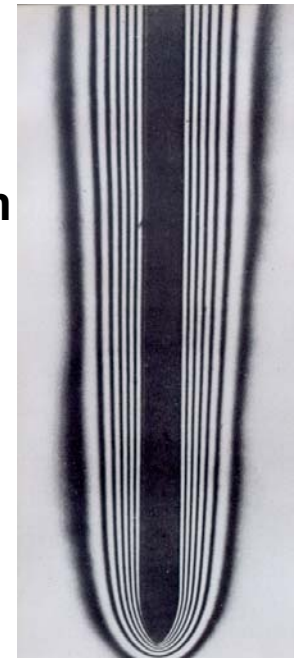
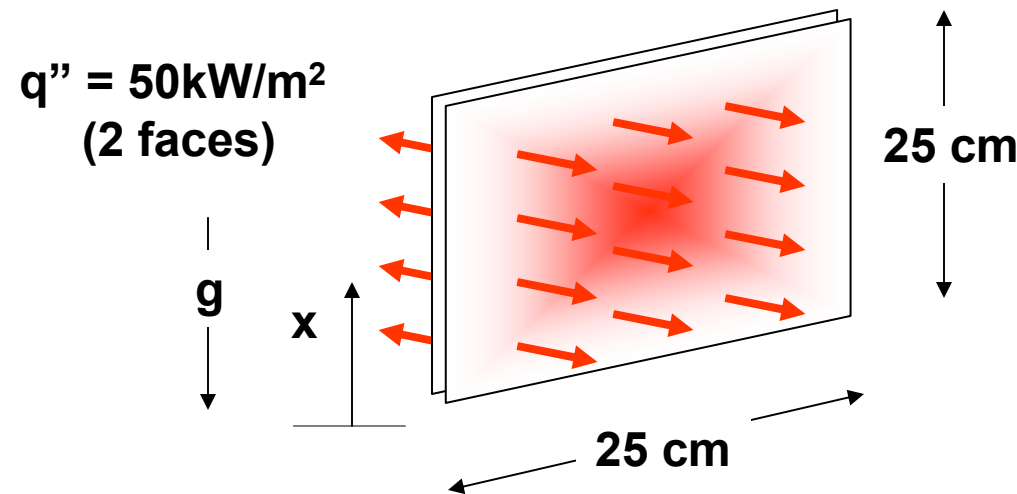
$$\overline{Nu}_L = 0.664 \cdot (Re_L)^{1/2} \cdot Pr^{1/3} = 2.32$$

$$\overline{Nu}_T = \frac{0.037 \cdot Re_L^{0.8} \cdot Pr}{1 + 2.443 \cdot Re_L^{-0.1} \cdot (Pr^{2/3} - 1)} = 0.38$$

$$\overline{Nu} = 2.65$$

$$h = 93.8 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

**6.39** Uma placa plana vertical fina eletricamente aquecida, de 25 cm x 25 cm, está imersa em um grande tanque de água. A energia elétrica fornecida à placa foi medida e encontrou-se o valor de 6,25 kW. Estime a temperatura máxima da superfície da placa supondo que exista uma condição de contorno de fluxo de calor constante em ambas as faces verticais. A temperatura média da água é 5 °C e as propriedades termofísicas usadas nos cálculos são avaliadas a 32,2 °C



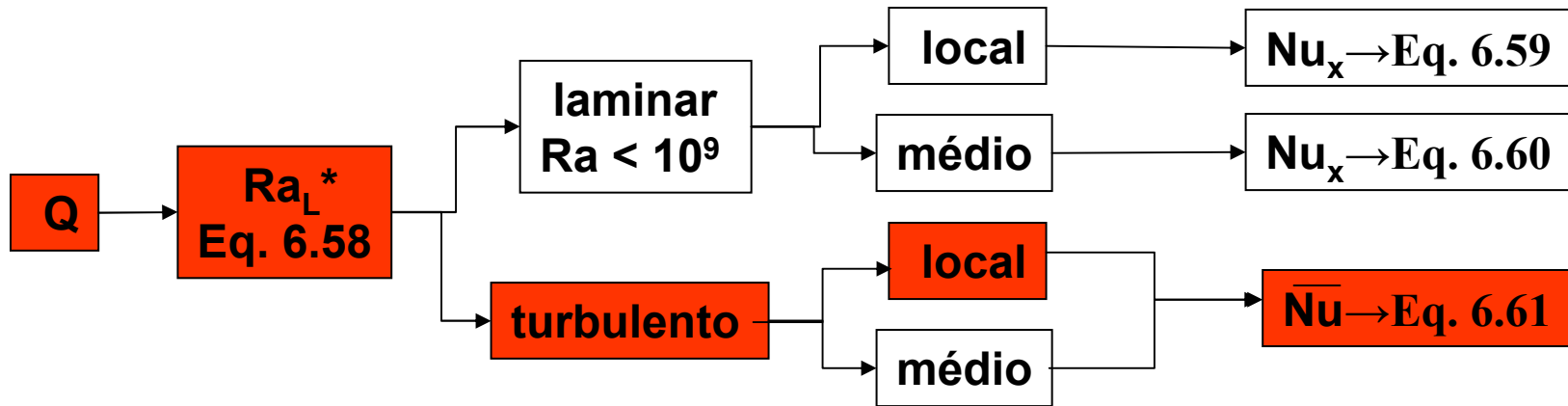
Propriedades água  
@ 30°C - Tab. A-9

$C_p = 4180$	J/kg°C
$\rho = 995.7$	kg/m <sup>3</sup>
$\mu = 79.78 \cdot 10^{-5}$	kg/m/s
$\nu = 0.80 \cdot 10^{-6}$	m <sup>2</sup> /s
$k = 61.5 \cdot 10^{-2}$	W/m°C
$Pr = 5.42$	
$\beta = 0.306$	1/K

**Convecção natural ! A máxima temperatura ocorre em  $x = 25 \text{ cm}$**

$$\text{Eq. 6-58} \rightarrow Ra^* = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot C_p \cdot \beta \cdot \dot{q}'' \cdot L^4}{\mu \cdot k^2} = 8.95 \cdot 10^{15}$$

sendo L o comprimento vertical, L = 25 cm



$$\text{Eq. 6-62} \rightarrow \phi(\text{Pr}) = \left[ 1 + \left( \frac{0.437}{\text{Pr}} \right)^{9/16} \right]^{-16/9} = 0.664$$

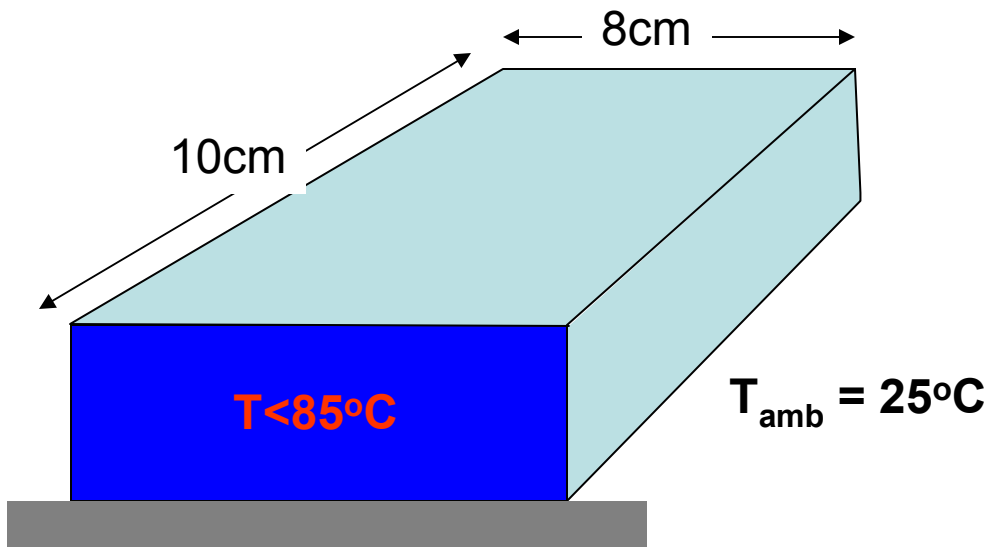
$$\text{Eq. 6-61} \rightarrow \text{Nu} = 0.241 \left[ Ra_L^* \phi(\text{Pr}) \right]^{1/5} = 346$$

$$\overline{\text{Nu}} = 346$$

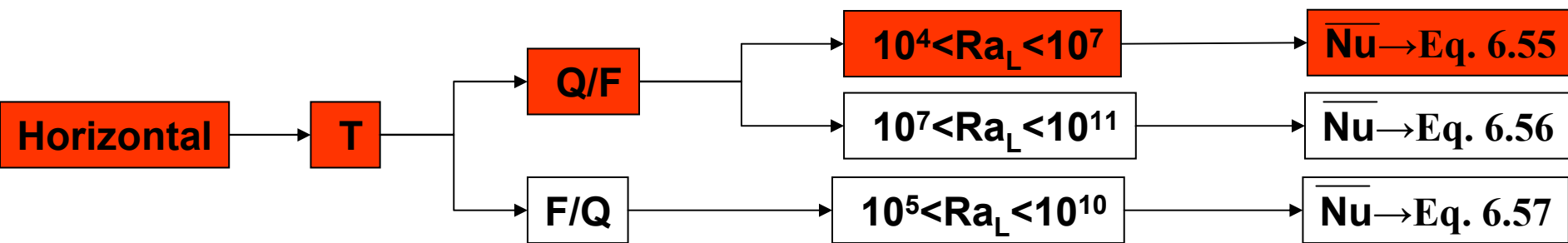
$$h = 851 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{q}'' = h \cdot (T_p - 5) \rightarrow T_p \leq \sim 63.8^\circ\text{C}$$

**6-40** Componentes eletrônicos estão instalados numa pequena caixa selada de 10 cm de comprimento e 8 cm de largura. A temperatura do ar circundante é de 25°C. As características operacionais da unidade deteriorar-se-ão se a temperatura da superfície da caixa exceder 85°C. Estime a potência máxima que pode ser dissipada pelos componentes. Os lados e o fundo caixa são isolados e a temperatura da superfície superior é suposta ser uniforme.



Qual é a potência máxima que pode ser dissipada pela placa horizontal em convecção natural pela face superior desde que  $T < 85^\circ\text{C}$ ?



**Temperatura de filme:  $(85+25)/2 = 55^\circ\text{C}$**

**Propriedades ar  
@  $50^\circ\text{C}$  - Tab. A-8**

$$C_p = 1007.4$$

$$\rho = 1.0924$$

$$\mu = 19.57 \cdot 10^{-6}$$

$$\nu = 17.92 \cdot 10^{-6}$$

$$k = 27.81 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Pr} = 0.709$$

$$\beta = 0.0031$$

(gás perfeito  $1/T$ )

**Cálculo Rayleigh, Eq. 6-50**

$$\text{Ra}_L = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot C_p \cdot \beta \cdot (T_p - T_\infty) \cdot L^3}{\mu \cdot k} = 4.23 \cdot 10^4$$

$$\text{sendo } L = \frac{\text{Area}}{\text{Perimetro}} = 2.22 \text{ cm}$$

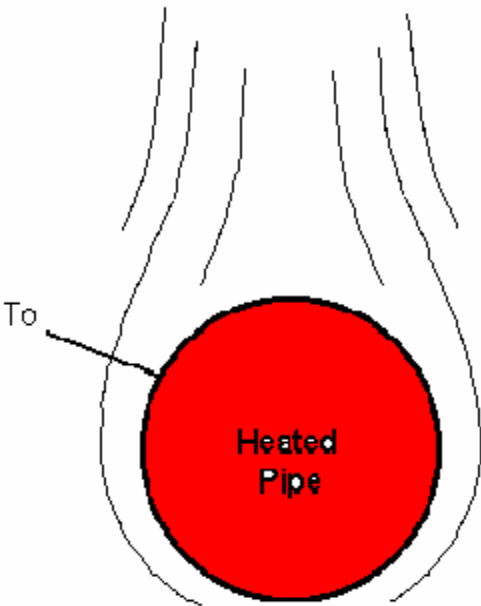
$$\text{Eq. 6-55} \rightarrow \text{Nu}_L = 0.54 \cdot \text{Ra}_L^{1/4} = 7.77$$

$$\overline{\text{Nu}} = 7.77$$

$$h = \frac{(7.77 \cdot 0.00278)}{0.022} = 9.82 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_p - T_\infty) = 4.7 \text{ W}$$

**6.42** Uma tubulação horizontal não isolada de água com diâmetro externo de 3 cm e temperatura de superfície de 15°C passa através de uma sala. A temperatura do ar na sala é de 25°C. Determine a taxa de transferência de calor por unidade de comprimento da tubulação.



Propriedades água  
 $T_{filme} = 20^\circ\text{C}$  - Tab. A-9

- $C_p = 1006.1$
- $\rho = 1.2042$
- $\mu = 18.17 \cdot 10^{-6}$
- $\nu = 15.09 \cdot 10^{-6}$
- $k = 25.64 \cdot 10^{-3}$
- $Pr = 0.713$
- $\beta = 0.0034$

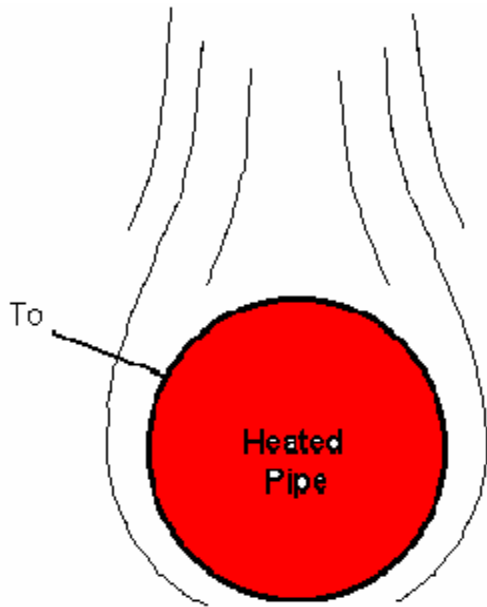
**Convecção Natural Isotérmica Lam/Turb.**

$$\overline{Nu} = \left\{ \sqrt{\overline{Nu}_0} + \left( \frac{Ra_{LC} \cdot \xi \cdot Pr}{300} \right)^{1/6} \right\}^2$$

Eq. 6.63

$\xi \rightarrow$  Eq. 6.64

$\overline{Nu}_0$  &  $L_c \rightarrow$  Tab. 6.6



**Tabela 6-6** Parâmetros usados na eq. 6-63 para convecção natural.<sup>6</sup> comprimentos característicos e  $\overline{Nu}_0$  para correlações generalizadas

Geometria/Objeto	$L_c$	$\overline{Nu}_0$
Placa inclinada	$x$	0,68
Disco inclinado	$9d/11$	0,56
Cilindro vertical	$L$	0,68
Cilindro horizontal	$\pi d$	$0,36\pi$
Cone	$4L/5$	0,54
Esfera	$\pi d/2$	$\pi$
Esferóide	$3\pi V/A$	$A^3/36V^2$

*L é medido ao longo da superfície*

$$L_c = \pi d = 0.09424 \text{ m} \quad \& \quad Nu_0 = 0.36 \cdot \pi = 1.131$$

**Cálculo Rayleigh, Eq. 6-50**

$$Ra_L = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot C_p \cdot \beta \cdot (T_p - T_\infty) \cdot L^3}{\mu \cdot k} = 8.78 \cdot 10^5$$

sendo  $L = 0.094 \text{ m}$  e  $\beta = 0.0034 \text{ (1/K)}$  (gás perfeito)



$$\text{Eq. 6-63} \rightarrow \overline{\text{Nu}} = \left[ \overline{\text{Nu}}_0^{(1/2)} + \left( \frac{\text{Ra}_{\text{Lc}} \cdot \xi(\text{Pr})}{300} \right)^{(1/6)} \right]^2 = 19.0$$

$$\text{Eq. 6-64} \rightarrow \xi(\text{Pr}) = \frac{1}{\left[ 1 + \left( \frac{0.5}{\text{Pr}} \right)^{(9/6)} \right]^{(16/9)}} = 0.4398$$

$$\overline{\text{Nu}} = 19.0$$

$$h = \frac{\overline{\text{Nu}} \cdot \text{Lc}}{k} = 5.18 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\dot{Q} = h \cdot (\pi d \cdot w) \cdot (T_p - T_\infty) = 4.88 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$