Escoamentos Internos
Transferência de Calor

Transferência de Calor em Dutos

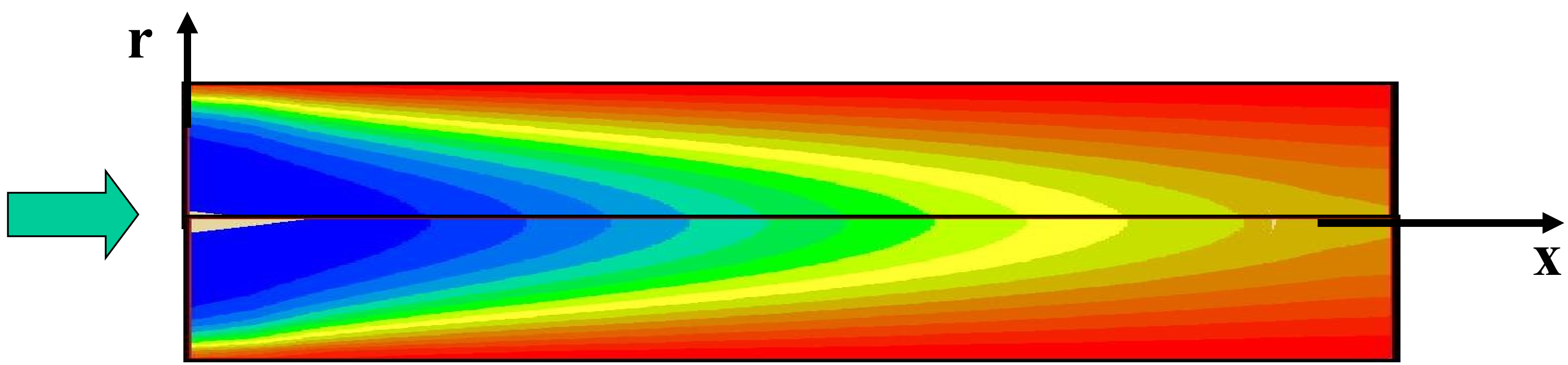
TÓPICOS

- O Balanço de Energia numa Tubulação
- A Temperatura Média de Mistura
- Fluxo de Calor Uniforme
- Temperatura de Parede Uniforme
- Nusselt Laminar & Turbulento
- Trocadores de Calor

Aquecimento de Fluido Numa Tubulação

- **Quando um fluido é aquecido (ou resfriado) numa tubulação (escoamento interno):**
- **Energia é transferida ao fluido ao longo da tubulação**
- **A temperatura do fluido varia <u>RADIALMENTE E AXIALMENTE</u> ao longo da tubulação**

Exemplo de aquecimento com parede a temperatura constante



Qual será a Temperatura de Referência

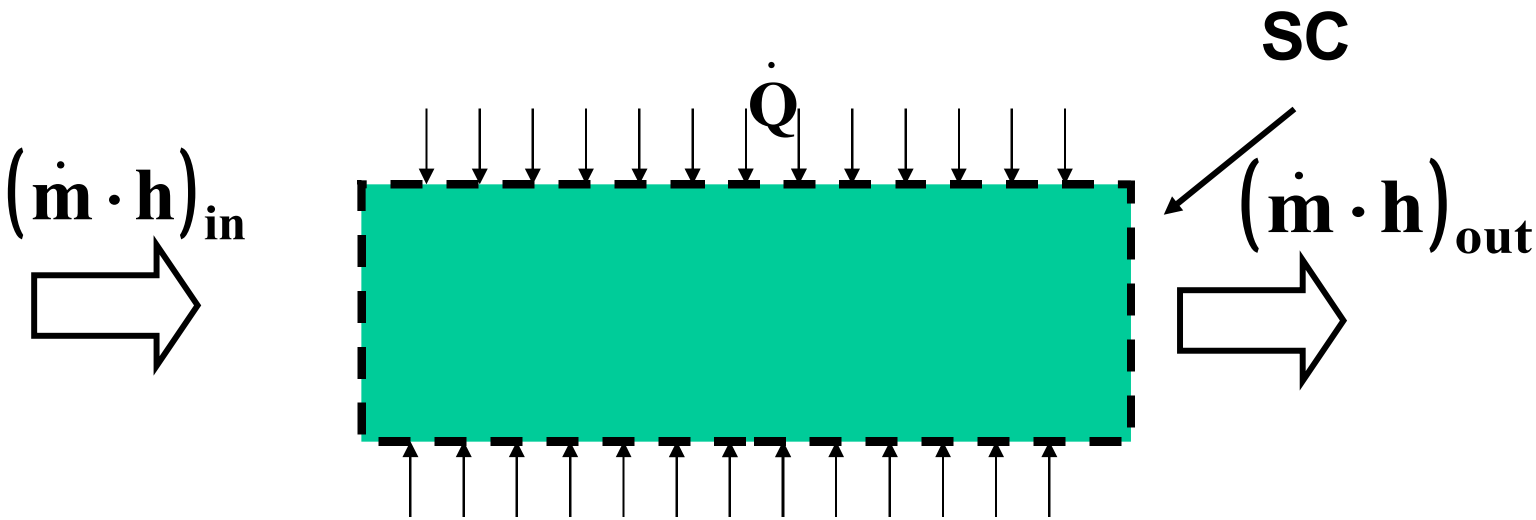
- **Foi visto em escoamentos externos que o fluxo de calor é determinado por meio de uma diferença entre duas temperaturas referenciadas. (exemplo: Tparede & T fluido externo)**

- **Para escoamentos internos (confinados) é necessário um cuidado especial para estabelecer *a temperatura de referência.***

- **Note que a temperatura do fluido varia axialmente e radialmente!**

Variação de Energia no Fluido

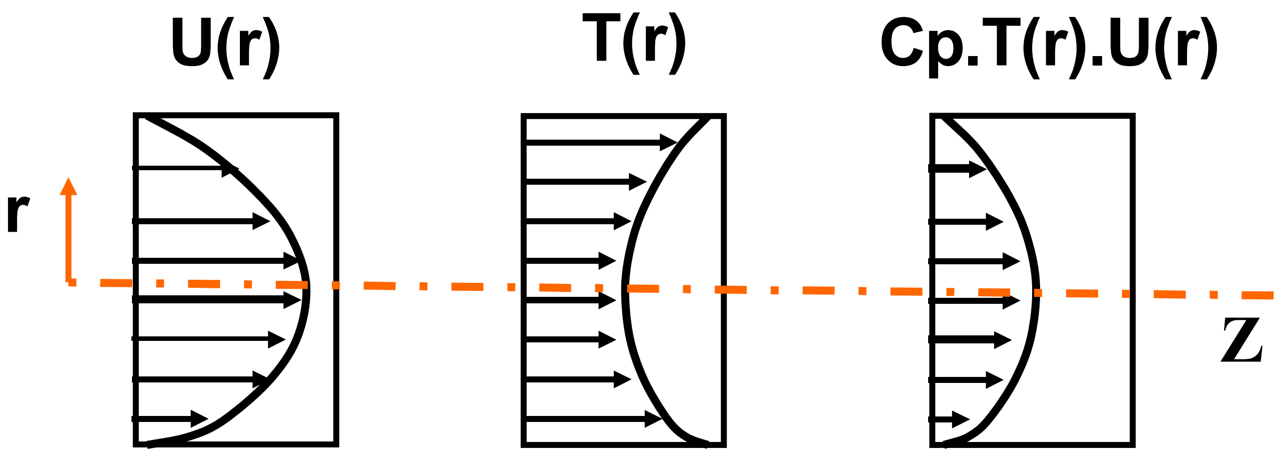
- Para se determinar a variação da energia do fluido é necessário realizar um balanço de energia (1ª lei) para um volume de controle que envolva o fluido:



$$\dot{m}\left(h_{out} - h_{in}\right) = \dot{Q}$$

Como Calcular a Entalpia de Entrada e Saída do V.C.?

- Note que tanto para a entrada como para a saída, existe um perfil radial de velocidades e de temperaturas que, conjuntamente, realizam o transporte da entalpia!
- Do ponto de vista local, $dh = C_p T dm = C_p T(\rho V dA)$



Perfil Velocidades | Perfil Temperaturas | Perfil $J.kg^{-1}.m^{-2}$

Energia

$$\dot{m}h = \int_A \rho C_p u(r) T(r) dA$$

Como Calcular a Entalpia de Entrada e Saída do V.C.?

- A entalpia na <u>*entrada ou saída*</u> do V.C. é então determinada por meio da integral do produto entre a velocidade, temperatura e calor específico

$$\dot{m}h = \int_A \rho C_p u(r) T(r) dA$$

- O lado esquerdo pode ser representado pelo produto entre Cp e uma TEMPERATURA DE MISTURA, Tm

$$h \equiv C_p T_m$$

- Substituindo uma eq. na outra, chega-se a definição da temperatura de mistura:

$$\dot{m} C_p T_m = \int_A \rho C_p u(r) T(r) dA \quad \Rightarrow \quad T_m = \frac{\int_A \rho C_p u(r) T(r) dA}{\dot{m} C_p}$$

O que Significa *Temperatura de Mistura*

- Tm é a temperatura que você obtêm se tirasse uma amostra de fluido em toda seção transversal do duto, colocasse em um copo e fizesse uma mistura.
- Ela é ***MUITO CONVENIENTE*** pois o produto CpTm expressa a entalpia específica na seção transversal do duto

- Neste caso o balanço de energia numa tubulação fica sendo:

$$\dot{m}\left(h_{out} - h_{in}\right) = \dot{Q} \quad \Longrightarrow \quad \dot{m}C_p\left(Tm_{out} - Tm_{in}\right) = \dot{Q}$$

O que Significa Temperatura de Mistura?

- **Ao transferir calor para um fluido dentro de um duto, pode-se dizer que sua temperatura de mistura varia!**
- **Se for aquecimento, Tm aumenta ao longo de X**
- **Se for resfriamento, Tm diminui ao longo de X**

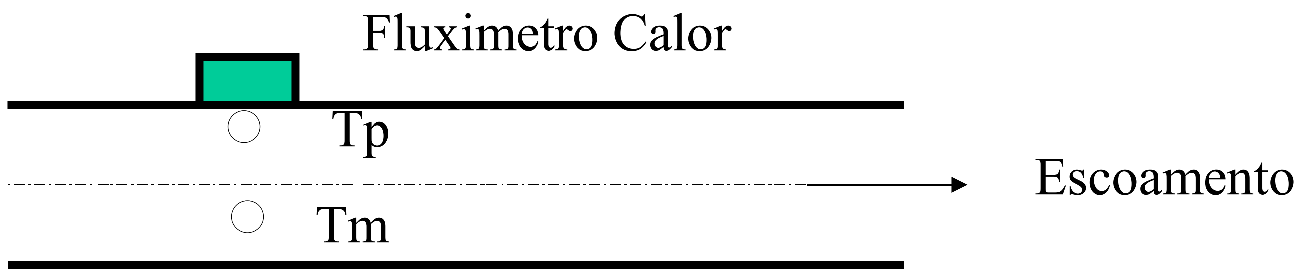
- **A temperatura de mistura passa a ser uma das temperaturas de referência para cálculos de coeficiente de transferência de calor.**

O Coeficiente de Transferência de Calor

- O fluxo de calor por unidade de área, é então determinado pelo produto entre o coeficiente de transferência de calor e a diferença entre a Temperatura da Parede e a Temperatura da mistura:

$$\dot{q}''_x = h_x \left(T_p - T_m\right)$$

Ex. 7-18 **Um arranjo experimental foi projetado para medir o coeficiente local de transferência de calor . O fluxo de calor local é medido usando um medidor de fluxo de calor! Um termopar é usado para medir a temp. da parede. Um arranjo termopar-tubo Pitot é usado para medir as distribuições de velocidade e temperatura a fim de determinar a temperatura de mistura. Os resultados experimentais foram: q”=12980kW/m2, Tp = 52,1oC e Tm=18,3oC. Calcule o coeficiente local de transferência de calor.**



$$\dot{q}_x'' = h_x\left(T_p - T_m\right) \rightarrow h = \frac{\dot{q}_x''}{\left(T_p - T_m\right)} = \frac{12980}{\left(52,1-18,2\right)} = 382\,\frac{\mathbf{kW}}{\mathbf{m}^2\,{}^{\mathbf{o}}\mathbf{C}}$$

Perfil de Temperaturas & Desenvolvimento Térmico

- **Quando um fluido recebe um fluxo de calor ao longo da parede do tubo, sua temperatura varia tanto na direção radial e como na axial .**

- **Esta é uma situação diferente da hidrodinâmica onde o perfil de velocidades não varia axialmente após uma certa distância.**

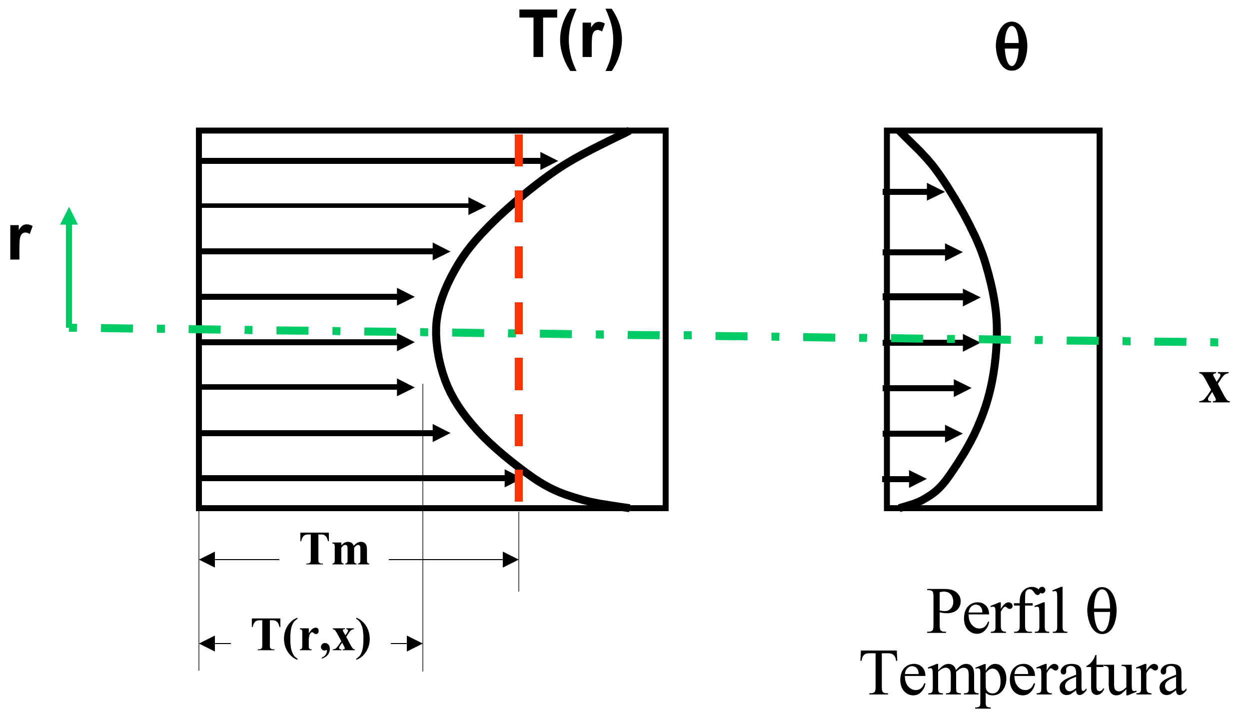
- **Pode-se alcançar um regime termicamente desenvolvido para dutos?**

Perfil de Temperaturas & Desenvolvimento Térmico

- Pode-se mostrar que a forma RELATIVA do perfil de temperatura não varia com x, a partir de uma certa distância da entrada para condições de fluxo de calor constante e temperatura constante:

$$\theta = \frac{T_p - T(r,x)}{T_p - T_m}$$

- Quando $d\theta/dx = 0$ ele é dito termicamente desenvolvido:

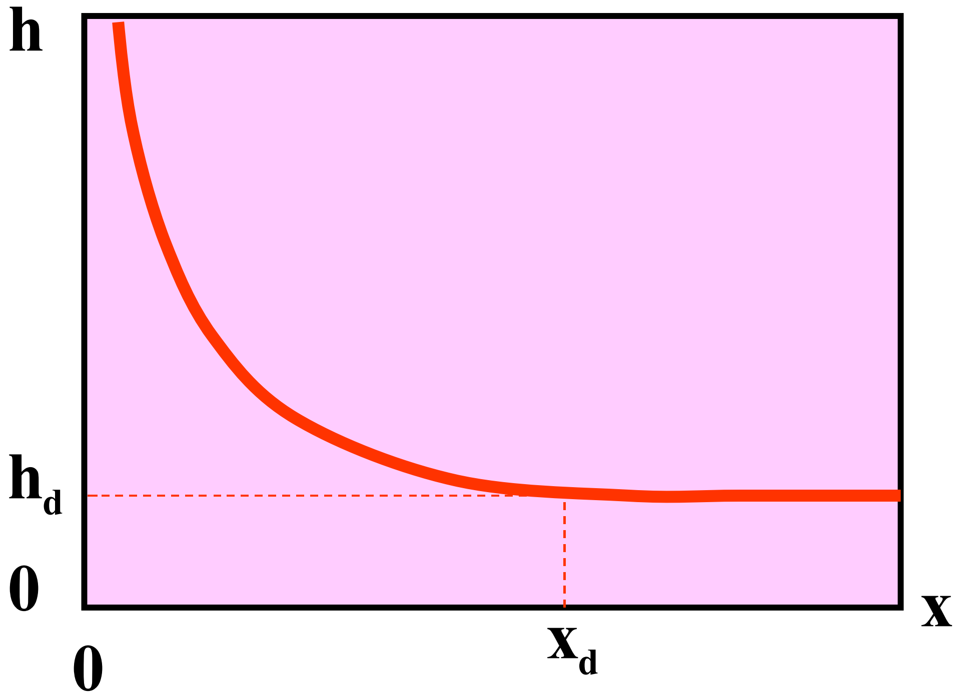


Nusselt & Efeitos de Entrada

• O Nusselt é definido por:

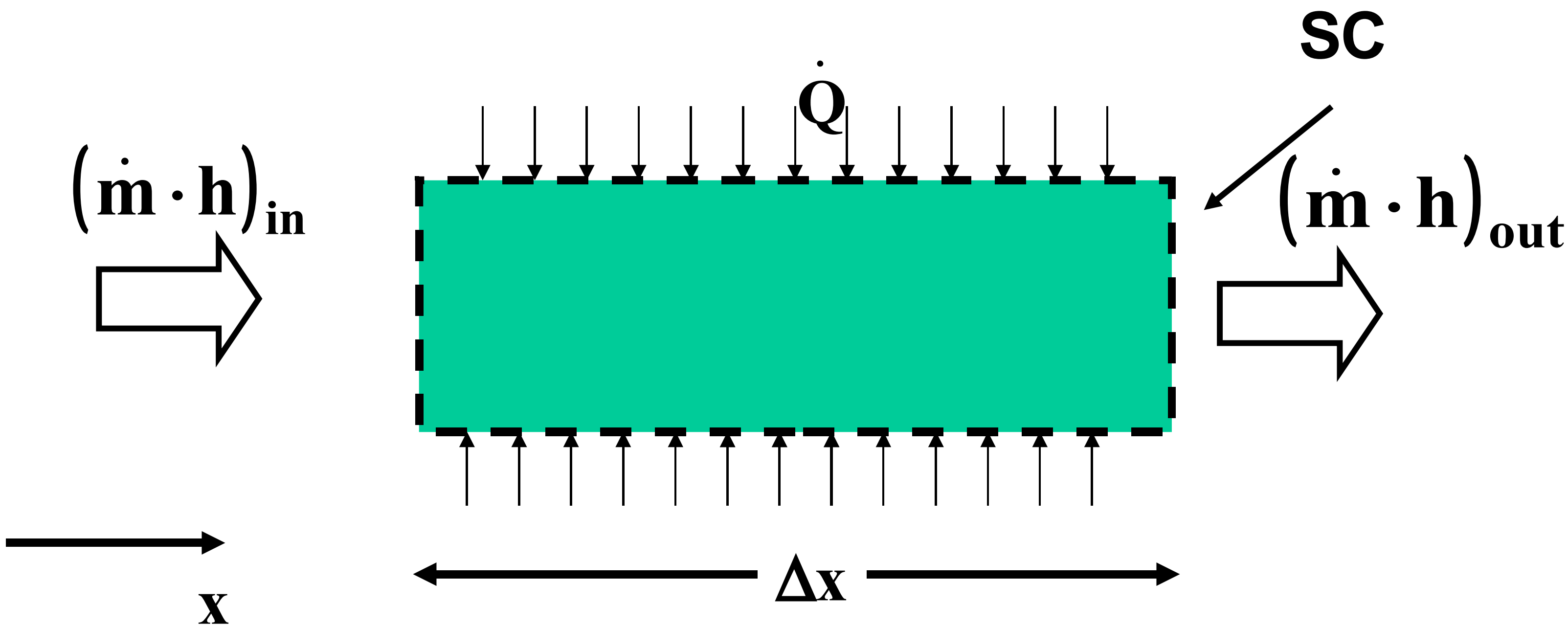
$$Nu_x = \frac{h \cdot d_h}{k_f}$$

• Sua variação ao longo da direção x do duto é representada na figura. Se o escoamento está termicamente desenvolvido, h é constante.



Balanço de Energia no Fluido

- Para se determinar a variação da energia do fluido é necessário realizar um balanço de energia (1ª lei) para um volume de controle que envolva o fluido:



$$\dot{m}\left(h_{out}-h_{in}\right)=\dot{Q}$$

Balanço de Energia no Fluido

- Expressando-se os fluxos em função da temperatura de mistura:

$$\dot{m}h_e = \left(\rho \bar{U} A\right) \cdot C_p \cdot T_{me}$$

$$\dot{m}h_s = \left(\dot{m}h_e\right) + \left(\rho \bar{U} A\right) \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dx} \Delta x$$

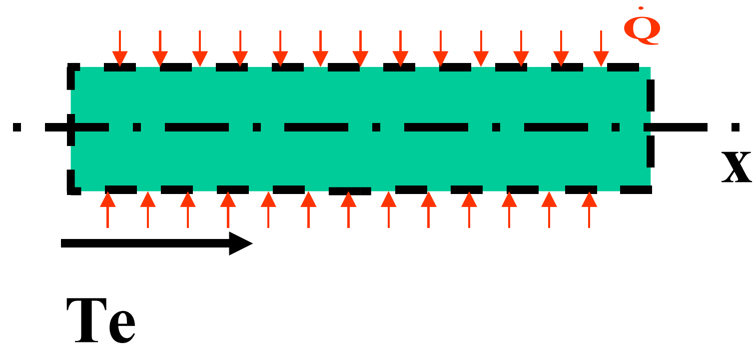
$$\dot{Q} = \dot{q}_x'' \cdot P \cdot \Delta x$$

$$\left(\rho \bar{U} A\right) \cdot C_p \cdot \frac{dT_m}{dx} = \dot{q}_x'' \cdot P$$

CASO Q – A Temperatura de Mistura

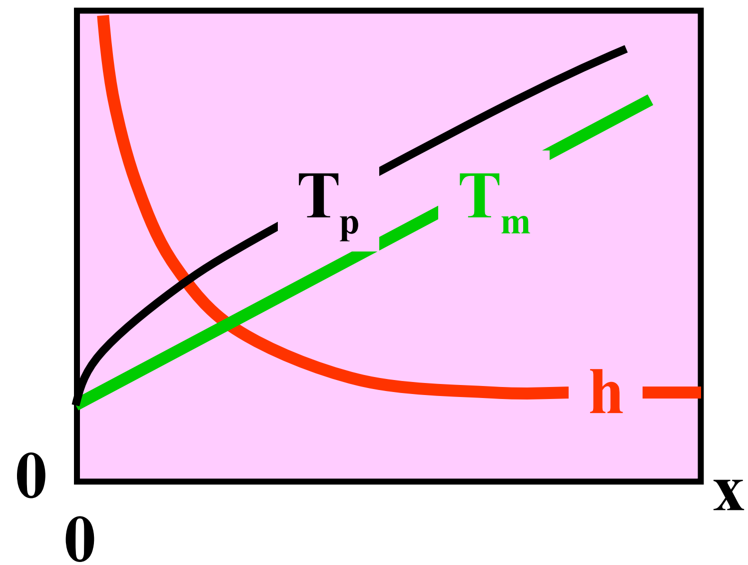
- **Balanço de energia:**

$$\left(\rho\bar{U}A\right)\cdot C_p\cdot\frac{dT_m}{dx}=\dot{q}''_x\cdot P$$



- **Fluxo de calor constante, pode-se integrar diretamente a equação do balanço de energia:**

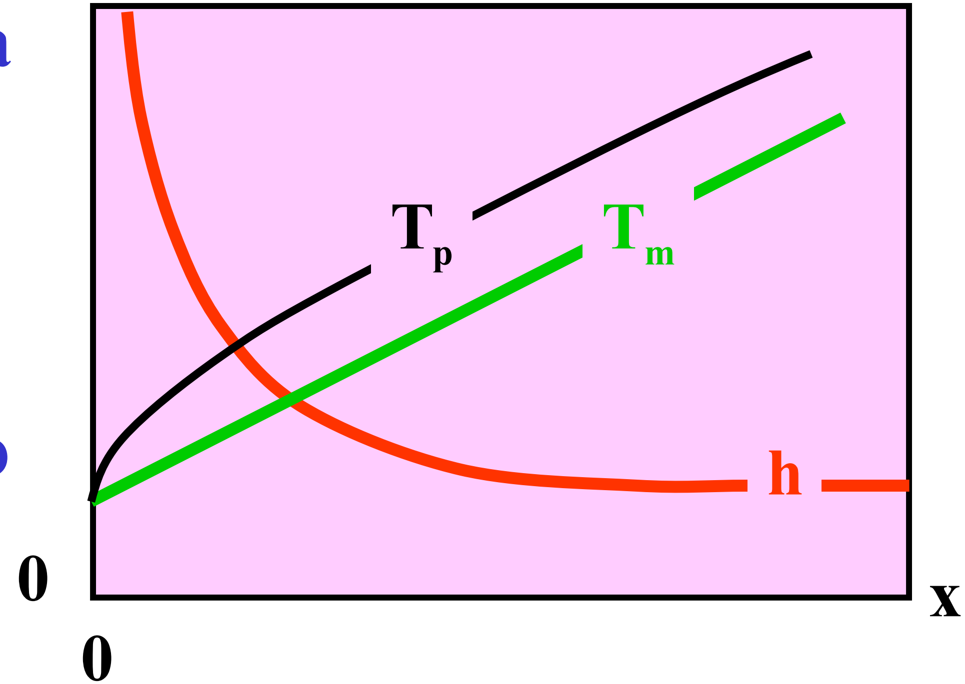
$$T_m\left(x\right)=\frac{\dot{q}''_x\cdot P\cdot x}{\dot{m}\cdot C_p}+T_{me}$$



- **Onde T_{me} é a temperatura de mistura da entrada**

CASO Q – A Temperatura Parede

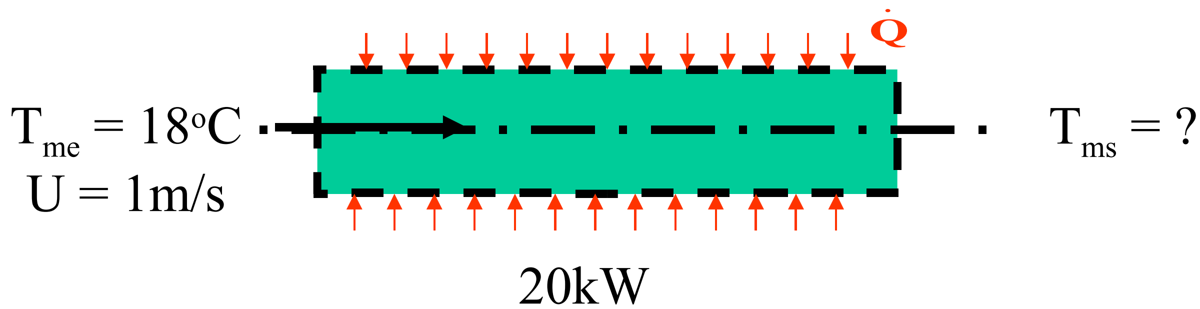
- **A temperatura de mistura varia linearmente com a distância x;**
- **Para aquecimento, a *temperatura de parede* sempre aumenta.**
- **Ela pode ser calculada por meio de T mistura:**



$$\dot{q}''_x = h_x\left(T_p - T_m\right) \Rightarrow T_p(x) = \frac{\dot{q}''_x}{h_x} + T_m(x)$$

- **Note que para esc. desenvolvido, h é constante e portanto Tp possui a mesma inclinação que Tm, veja figura.**

Ex. 7-21 Água escoa através de um duto aquecido, 3cm diâmetro, com velocidade média de 1 m/s. A temperatura de mistura da água na entrada da seção de aquecimento vale 18°C. 20kW de potência são transferidos para água. Calcule a temperatura de mistura da água no ponto que ela deixa o tubo. Despreza variações da energia cinética e potencial.



Propriedades avaliadas na temperatura média de mistura: 20°C chute! -> Tabela A-9

Cp	ρ	ν	k	Pr
4182	**998**	**1.10^{-6}**	**0.59**	**6.99**

$m = \rho.U.A = 0.7054$ kg/s

] Ex. 7-21 Processo a fluxo de calor constante, Eq. 7.20

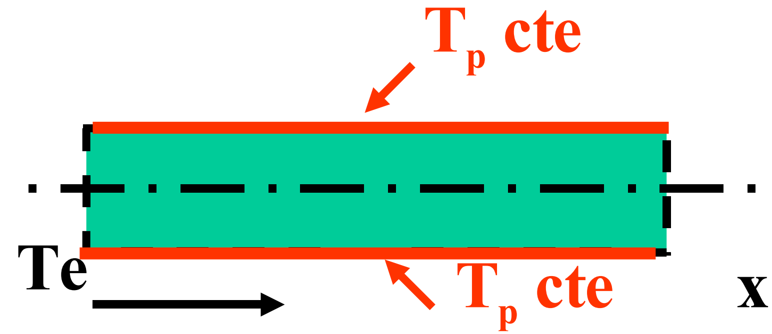
$$T_m(x) = \frac{\dot{q}_x'' \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{me}$$

Reconhecendo que q''A = Q, então:

$$T_{ms} = \frac{20000}{0.7054 \cdot 4182} + 18 = 24.8\,^{o}C$$

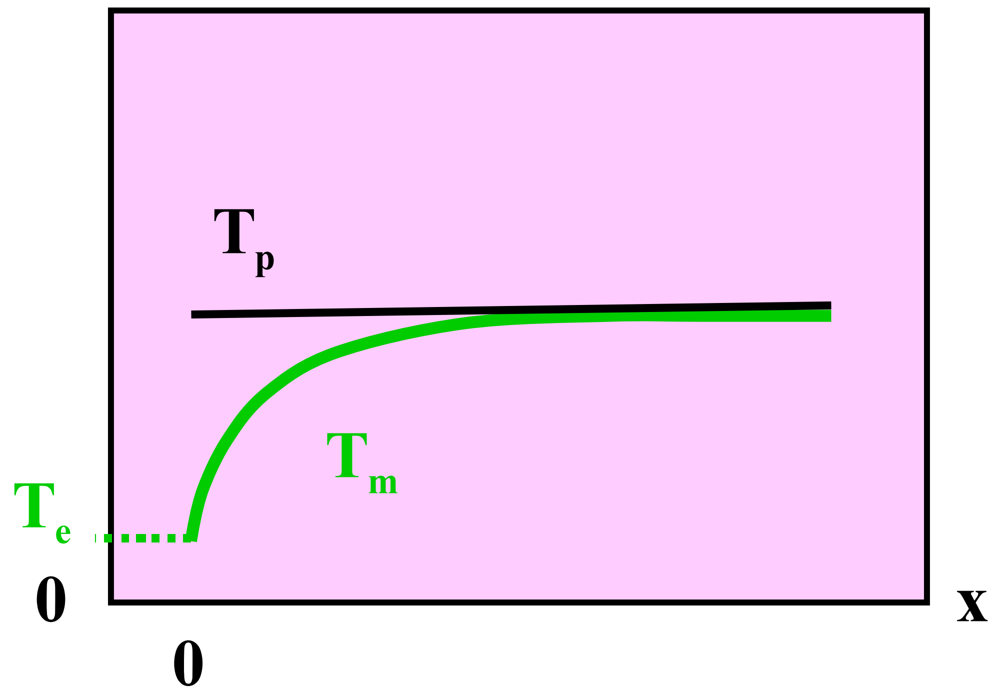
CASO T – A Temperatura de Mistura

$$\dot{m}\cdot C_p\cdot\frac{dT_m}{dx}=\dot{q}''_x\cdot P\;=\bar{h}\cdot P\cdot\left(T_p-T_m\right)$$



- Para temperatura de parede constante não é possível integrar diretamente a eq. do balanço.

- Mas assumindo um h médio entre a entrada e saída, ela pode ser integrada



$$Ln\left(T_p-T_m\right)\Big|_e^s=-\frac{\bar{h}\cdot P\cdot x}{\dot{m}\cdot C_p}$$

- Onde Tme é a temperatura de mistura da entrada

CASO T - A Temperatura de Mistura

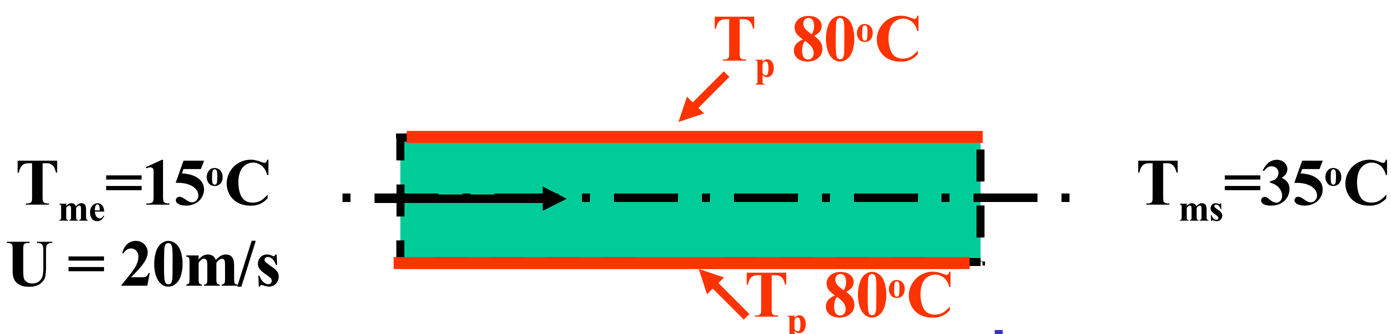
- Para qualquer posição axial do tubo,

$$\frac{T_p - T_m(x)}{T_p - T_{me}} = EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot x}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

- Quando x = L (comprimento total do tubo), P.L = A (área de transferência de calor), então

$$\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}} = EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

Ex. 7-23 Ar entra em um duto circular de 3 cm de diâmetro com uma velocidade média de 20 m/s. A superfície do duto está a uma temperatura uniforme de 80°C, enquanto que a temperatura de mistura do ar que entra no duto vale 15°C. ***Determine o comprimento do duto*** necessário para obter uma temperatura de mistura na saída de 35°C. O coeficiente médio de transferência de calor vale 80 W/m² °C.



Propriedades avaliadas na temperatura média de mistura: (15+35)/2 = 25°C -> Tabela A-8

Cp	ρ	ν	k	Pr
1006.3	1.160	16.10^{-6}	26.10^{-3}	0.713

$m = \rho.U.A = 0.01674$ kg/s

$P = \pi d = 0.094$ m

Ex. 7-23 O comprimento do duto pode ser determinado a partir do balanço de energia, Eq. 7.22

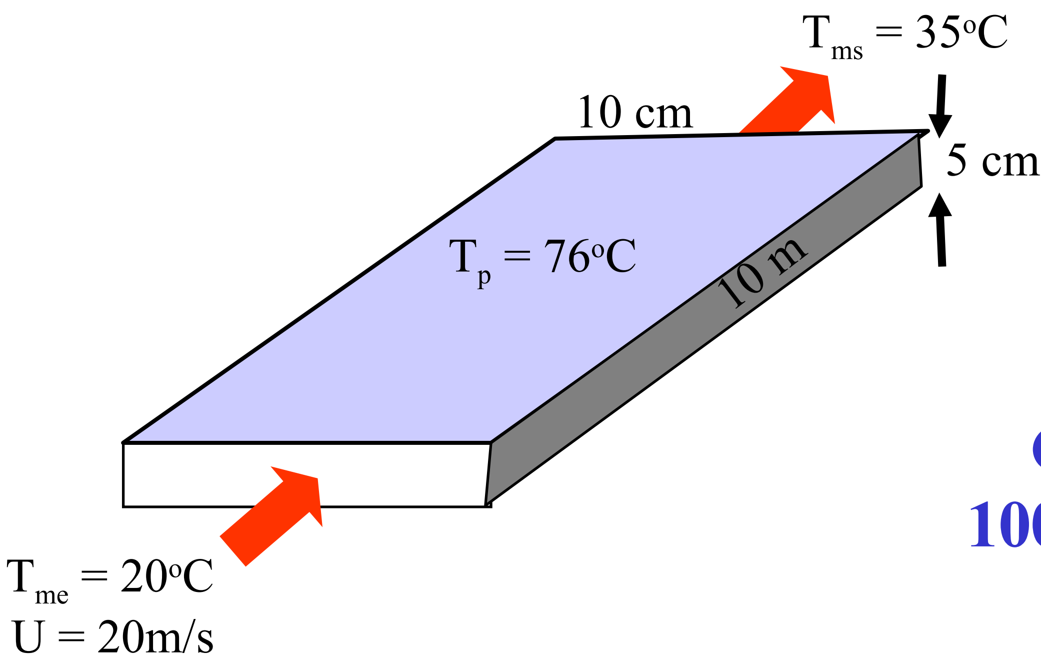
$$\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}} = EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$$

Reconhecendo que A é a área de troca de calor, A = P.L, podemos isolar L

$$L = -\left(\frac{\dot{m} \cdot C_p}{h \cdot P}\right) \cdot Ln\left(\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}}\right)$$

$$L = -\left(\frac{0.016 \cdot 1006}{80 \cdot 0.094}\right) \cdot Ln\left(\frac{80-35}{80-15}\right) = 0.822m$$

Ex. 7-25 Ar a 20°C entra em um duto retangular de 10cmx5cmx10m de comprimento. A temperatrua de mistura do ar que deixa o duto vale 35°C. A velocidade média do ar vale 20 m/s e as paredes internas do duto são mantidas a 76°C. Determine: i) a taxa de transferência de calor do ar e ii) estime o coeficiente médio de transferência de calor usando os dados experimentais.



Propriedades avaliadas na temperatura média de mistura: (20+35)/2 = 28°C
Tabela A-8

Cp	ρ	ν	k	Pr
1006,3	**1.160**	**16.10^{-6}**	**26.10^{-3}**	**0,713**

Ex. 7-25 Para o canal retangular, temos que sua área transversal, A_T, e o perímetro molhado, P são, respectivamente:

$$A_T = (5.10^{-2}x10.10^{-2}) = 5.10^{-3}\ m^2 \quad \& \quad P = 2.(5.10^{-2}+10.10^{-2}) = 0,3\ m$$

O calor transferido é: $Q = m.Cp.(T_{ms} - T_{me})$

A vazão mássica: $m = \rho.U.A_T = 1.16x20x5.10^{-3} = 0.116\ kg/s$

Logo o calor transferido: $Q = 0.116x1006,3x(35\text{-}20) = 1751\ W$

O fluxo de calor: $q = Q/(\text{área troca calor})$

Área troca calor = $P.L = 0,3x10 = 3m^2$

Portanto o fluxo de calor $q'' = 1751/3 = 583,6\ W/m^2$

O coeficiente médio de transferência de calor vem da Eq. 7.22 para um processo isotérmico:

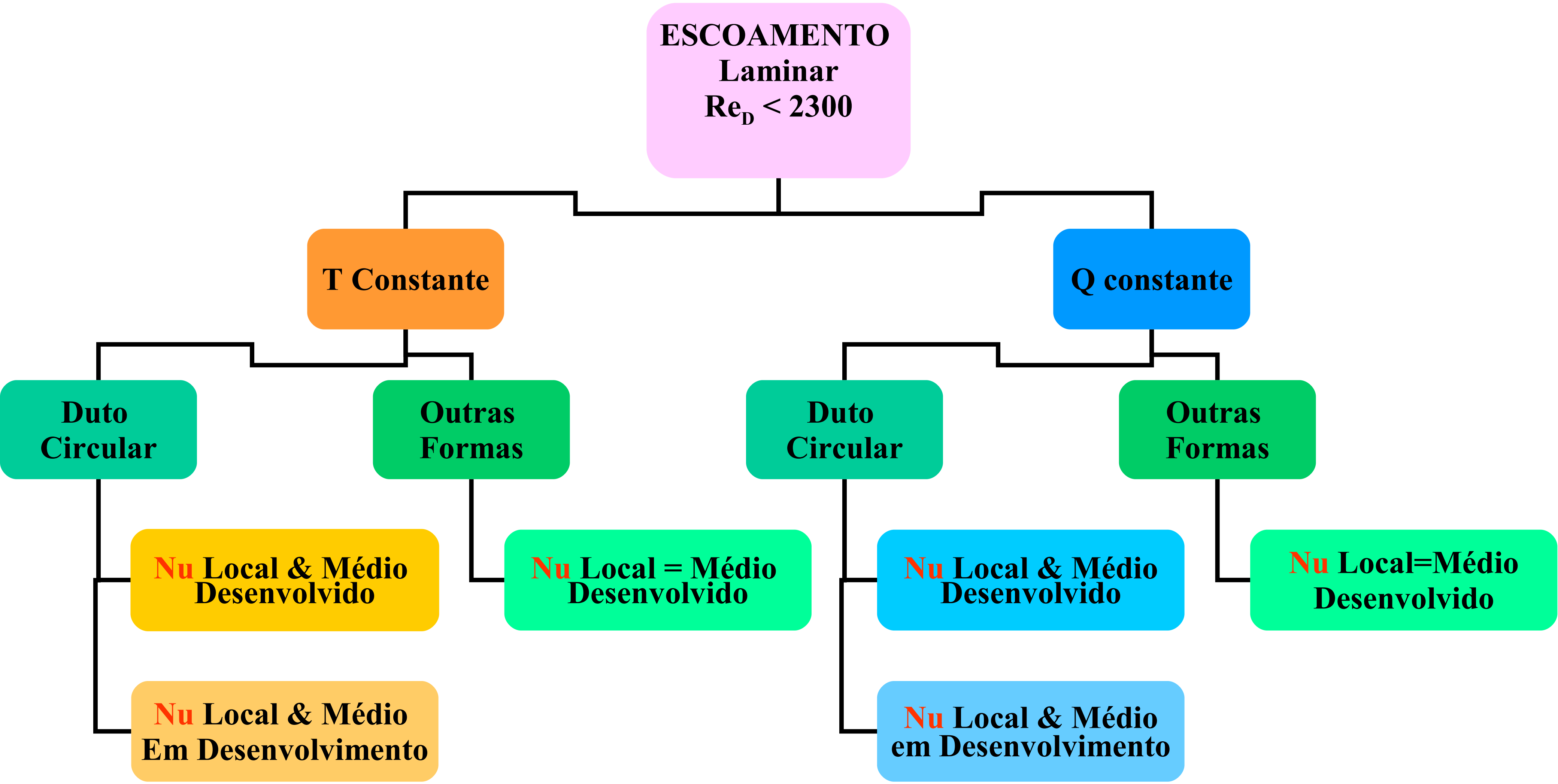
$$\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}} = EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} \right)$$

Isolando o coeficiente médio de transferência de calor:

$$\bar{h} = -\left(\frac{\dot{m} \cdot C_p}{P \cdot L} \right) \cdot Ln\left(\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}} \right)$$

$$\therefore \bar{h} = 12.3 \left(\frac{W}{m^2 \, {}^oC} \right)$$

CORRELAÇÕES PARA NUSSELT EM ESCOAMENTO LAMINAR



N. Nusselt para Tubos Circulares e perfil vel. desenvolvido. Escoamento Laminar Re_d < 2300 (Tab. 7.4)

Propriedades avaliadas na média da temperatura de mistura:

$$T_{prop} = (T_{m,e} + T_{m,s})/2$$

Variação propriedades na direção radial: correção Nusselt

$$Nu_{corr} = Nu^*(\mu_m/\mu_p)^{0.14}$$

onde (m) e (p) refere-se a propriedade avaliada na temp. de mistura e na temp. da parede.

$$\text{Peclet} = Pe = Re.Pr$$

Temp. const. & Pe.d/L < 100 térmicamente desenv. & $Nu_x = 3.66$

Q const. & Pe.d/L < 1000 térmicamente desenv. & $Nu_x = 4.36$

Tabela 7-4 Números de Nusselt para a transferência de calor para as regiões de entrada térmica de dutos circulares (perfíl de velocidade plenamente desenvolvido) dados por Gnielinski[4], Nu = *hd/k*

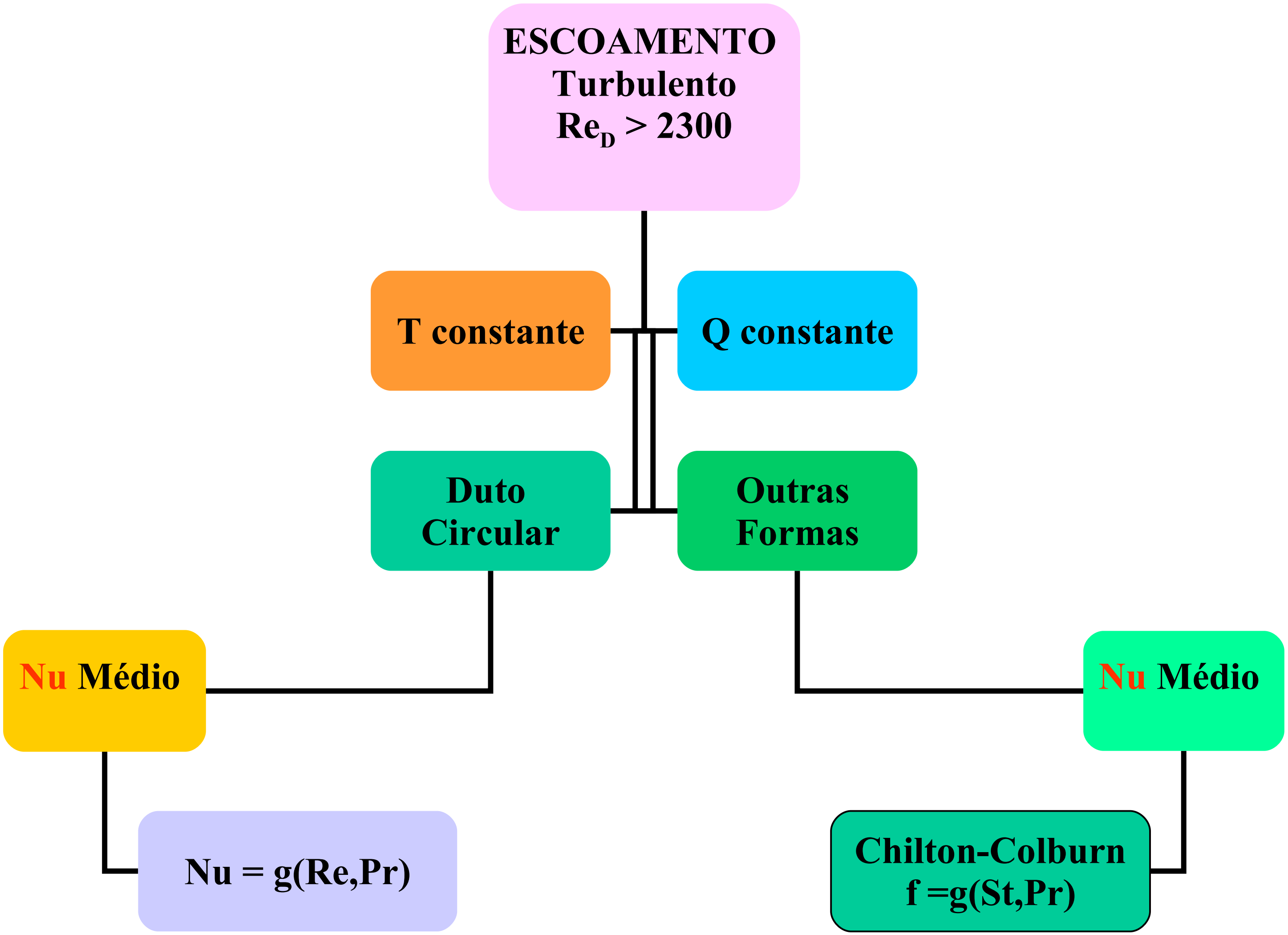
Correlação	Temperatura do Duto Uniforme	Observações
Local		
$\mathrm{Nu}_x = 1{,}077\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\dfrac{d}{x}}$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} > 10^2$
$\mathrm{Nu}_x = 3{,}66$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} < 10^2$
Médio		
$\overline{\mathrm{Nu}} = \sqrt[3]{(3{,}66)^3 + (1{,}61)^3\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L}}$		
	Fluxo de Calor Uniforme na Parede	
Local		
$\mathrm{Nu}_x = 1{,}302\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\dfrac{d}{x}}$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} > 10^4$
$\mathrm{Nu}_x = 4{,}36$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} < 10^3$
Médio		
$\overline{\mathrm{Nu}} = 1{,}953\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L}}$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} > 10^2$
$\overline{\mathrm{Nu}} = 4{,}36$		$\mathrm{Pe}\dfrac{d}{L} < 10$

Nusselt escoamento LAMINAR, desenvolvido, em dutos com seção transversal não-circular

Tabela 7-5 Números de Nusselt para escoamento laminar plenamente desenvolvido, $Nu = \dfrac{hd_h}{k}$

Configuração	Temperatura de parede uniforme	Fluxo de calor uniforme na parede
○	3,66	4,36
1 □ 1	2,98	3,61
1 ▭ 2	3,39	4,12
1 ▭ 8	5,60	6,49
1 ═ ∞	7,56	8,24
△	2,35	3,00

CORRELAÇÕES PARA NUSSELT ESCOAMENTO TURBULENTO



Nusselt: Escoamento Turbulento Re_d > 2300 em Tubos LISOS

$0,5 < Pr < 1,5$

$$\overline{Nu} = 0,0214(Re^{4/5} - 100)Pr^{2/5}\left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] \qquad (7\text{-}28)$$

$1,5 < Pr < 500$

$$\overline{Nu} = 0,012(Re^{0,87} - 280)Pr^{2/5}\left[1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] \qquad (7\text{-}29)$$

Propriedades avaliadas a temperatura média da mistura: $(T_{m,e}+T_{m,s})/2$

Correção variação radial das propriedades para líquidos:

$$\mathbf{Nu_{corr} = Nu^*(Pr_m/Pr_p)^{0.11}}$$

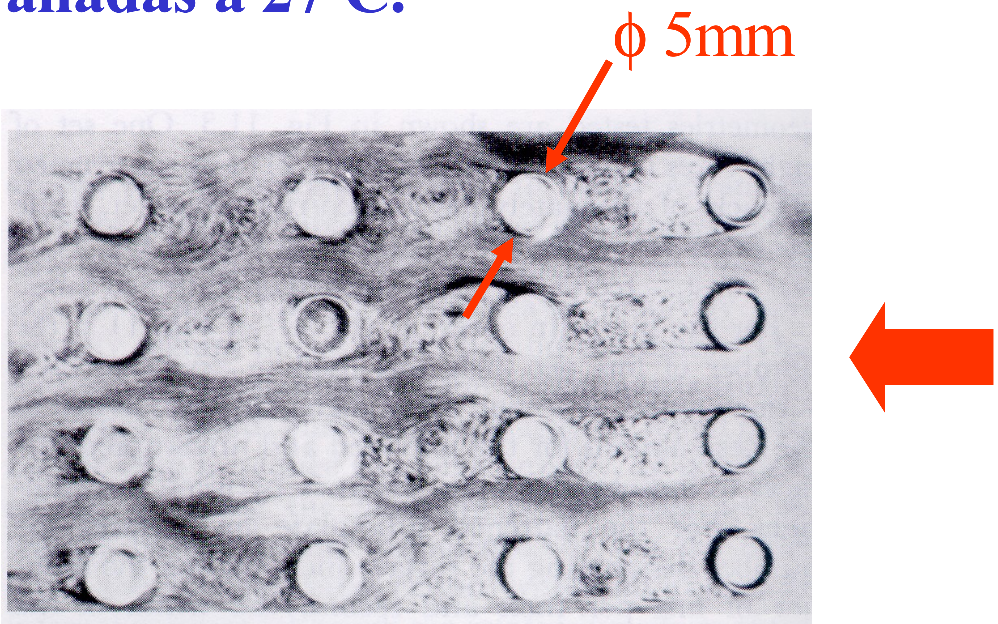
Principais Pontos da Aula

1. Definição de Temperatura de Mistura, Tm;
2. Fluxo Calor num Tubo $\longrightarrow$ $\dot{q}''_x = h_x \left(T_p - T_m\right)$

4. Balanço Energia num Tubo $\longrightarrow$ $\left(\rho \bar{U} A\right) \cdot C_p \cdot \dfrac{dTm}{dx} = \dot{q}''_x \cdot P$

1. Fluxo Calor na Parede Constante $\longrightarrow$ $Tm = \dfrac{\dot{q}''_x \cdot P \cdot x}{\dot{m} \cdot C_p} + T_e$
2. Temperatura na Parede Constante $\longrightarrow$ $\dfrac{T_p - T_m(L)}{T_p - T_E} = EXP\left(-\dfrac{\bar{h} \cdot A}{\dot{m} \cdot C_p}\right)$
3. Correlações Nu Laminar & Turbulento

Ex. 7-28 **Um pequeno condensador resfriado a ar deve ser projetado. O ar atravessa um certo número de pequenos tubos circulares que têm uma <u>temperatura uniforme</u>. Os dutos têm 5mm de diâmetro e 4 cm de comprimento. Estime o coeficiente médio de transferência de calor para o ar se o Re é igual a 1500. As propriedades termofísicas devem ser avaliadas a 27°C.**



1. *Arranjo de tubos em série.*
2. *Condensação ocorrendo externamente aos tubos; <u>processo a Temperatura Constante</u>.*
3. *Ar interno aos tubos recebe o calor.*

Regime: Laminar, Re < 2300

Ar @ 27°C (Tab. A-8)	Cp	ρ	ν	k	Pr
	1006.4	1.174	158.10^{-7}	27.10^{-3}	0.711

Ex. 7-28

Cálculo Peclet: Pe = Re.Pr = 1500. 0.711 = 1066.5

Cálculo d/L : 5/40 = 0.125

Cálculo Nu médio @ T : Tabela 7.4

$$\overline{\mathrm{Nu}} = \left(3.66^3 + 1.61^3 \cdot \left(\mathrm{Pe} \cdot \frac{d}{L}\right)\right)^{1/3} = 8.46$$

$$\overline{\mathrm{Nu}} = \frac{\bar{h} \cdot d}{k} = 8.46$$

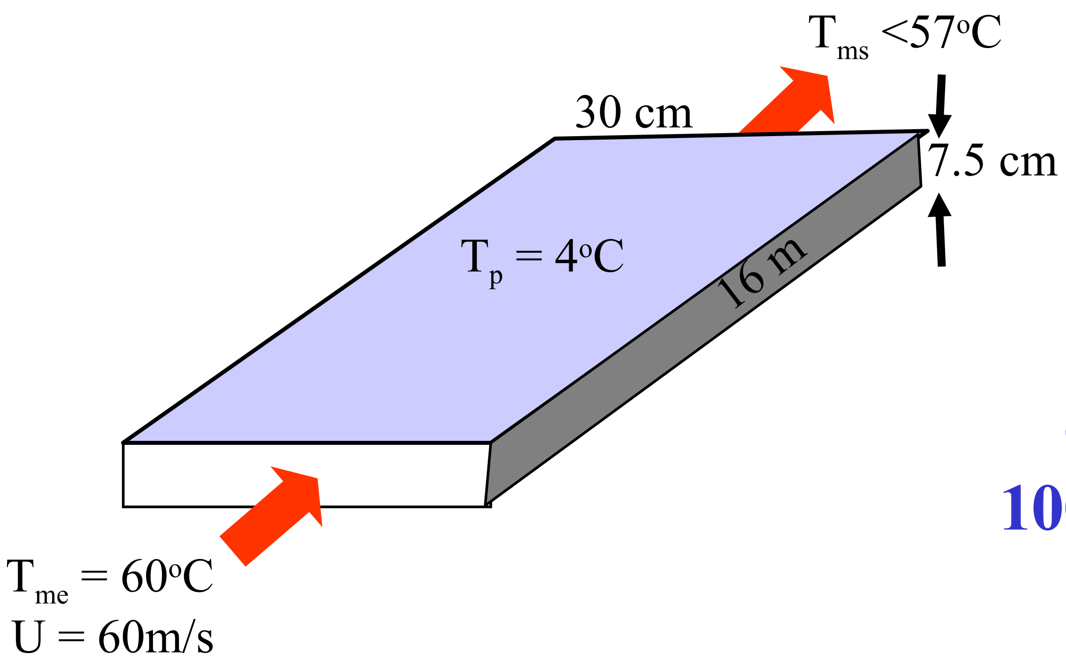
$$\downarrow$$

$$\bar{h} = \frac{k}{d} \cdot 8.46 = 45.7 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\,{}^{\mathrm{o}}\mathrm{C}}$$

Tabela 7-4 Números de Nusselt para a transferência de calor para as regiões de entrada térmica de dutos circulares (perfil de velocidade plenamente desenvolvido) dados por Gnielinski[4], $\mathrm{Nu} = hd/k$

Correlação	Observações
Temperatura do Duto Uniforme	
Local	
$\mathrm{Nu}_x = 1{,}077\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\frac{d}{x}}$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} > 10^2$
$\mathrm{Nu}_x = 3{,}66$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} < 10^2$
Médio	
$\overline{\mathrm{Nu}} = \sqrt[3]{(3{,}66)^3 + (1{,}61)^3\mathrm{Pe}\frac{d}{L}}$	
Fluxo de Calor Uniforme na Parede	
Local	
$\mathrm{Nu}_x = 1{,}302\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\frac{d}{x}}$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} > 10^4$
$\mathrm{Nu}_x = 4{,}36$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} < 10^3$
Médio	
$\overline{\mathrm{Nu}} = 1{,}953\sqrt[3]{\mathrm{Pe}\frac{d}{L}}$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} > 10^2$
$\overline{\mathrm{Nu}} = 4{,}36$	$\mathrm{Pe}\frac{d}{L} < 10$

Ex. 7-35 **Ar quente escoa através de um duto de seção retangular, 7.5cm por 30cm. O ar entra no duto com uma temperatura de mistura de 60°C e uma velocidade de 60m/s. O duto tem 16 m de comprimento e as paredes do duto podem ser consideradas com tendo <u>temperatura constante</u> igual a 4°C. Se a temperatura do ar que deixa o duto for menor que 57°C, ficou decidido que o duto deveria ser isolado. Você recomenda que o duto seja isolado?**



Propriedades avaliadas na temperatura média de mistura: (60+57)/2 ~ 60°C
Tabela A-8

Cp	ρ	ν	k	Pr
1008	1.059	19.10^{-6}	28.10^{-3}	0.703

Ex. 7-35 A temperatura de mistura na saída pode ser determinada da Eq. 7.22, desde que o h médio seja conhecido!

$$\frac{T_p - T_{ms}}{T_p - T_{me}} = \mathrm{EXP}\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} \right)$$

$$\rightarrow T_{ms} = T_p - \left(T_p - T_{me} \right) \cdot \mathrm{EXP}\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} \right)$$

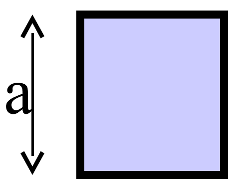
Para determinar h médio é preciso calcular Nu, Re e Pr. Começamos pelo Re.
Note que o tubo é quadrado. Como vamos definir um diâmetro apropriado?

Como Determinar h_f Tubos de Seção Não-Circular

O fator de atrito e o diagrama de Moody podem ser utilizados para tubos de seção não circular introduzindo-se o conceito de <u>Diâmetro Hidráulico:</u>

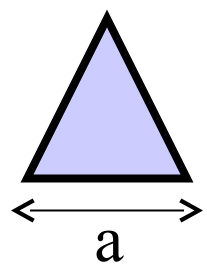
$$d_h = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}}$$

Canal seção quadrada ‘a’



d_h = a

Canal seção triangular ‘a’



$d_h = a / (48)^{0.5}$

Duas placas paralelas espaçadas ‘a’

d_h = 2a

• Ex. 7-35 Para o tubo de seção retangular temos que a área transversal ao fluxo, A_T, e o perímetro P são, respectivamente: 225 cm^2 e 75cm.

Logo o diâmetro hidráulico: $dh = 4.A_T/P = 12$ cm

O número de Re: $Re = U.d_h/\nu = 60.12.10^{-2}/(19.10^{-6})=3.81.10^5$

Regime: Turbulento pq. $Re_{dh} > 2300$

Nusselt médio é calculado com Eq. 7-28

$0,5 < Pr < 1,5$

$$\overline{Nu} = 0,0214(Re^{4/5} - 100)Pr^{2/5}\left[1+\left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] \quad (7\text{-}28)$$

$1,5 < Pr < 500$

$$\overline{Nu} = 0,012(Re^{0,87} - 280)Pr^{2/5}\left[1+\left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right] \quad (7\text{-}29)$$

$$\overline{Nu} = 0.0214\left[\mathbf{Re}^{4/5} - 100\right]\mathbf{Pr}^{2/5}\left(1+\left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right) = 541.6$$

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h}\cdot d}{k} = 541.6$$

$$\downarrow$$

$$\bar{h} = \frac{k}{d}\cdot 541.6 = 128.8\,\frac{W}{m^2\,{}^oC}$$

•Ex. 7-35 Sabendo-se que:

$T_{me} = 60^oC$

$m = \rho.V.A_T = 1.43$ kg/s

$P = 0.75$ m

$L = 16$m

$Cp = 1008$ J/kg^{o}C

$h = 128.8$ W/m^2 ^{o}C

$$T_{ms} = T_p - \left(T_p - T_{me}\right) \cdot EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = 23.16^o C$$

Como a temperatura de saída é menor que 57^{o}C, recomenda-se o isolamento do duto.

Ex. 7-37 Ar, a uma temperatura média de 300°C, escoa através de um duto rugoso de concreto de 10cm de diâmetro a uma velocidade média de 2m/s. A *rugosidade média vale 2 mm*. Estime o valor do coeficiente de transferência de calor. Compare seu resultado com o valor obtido para tubos lisos.

	Cp	ρ	ν	k	Pr
Ar @ 300°C (Tab. A-8)	1045.2	0.6159	477.10^{-7}	44.10^{-3}	0.698

$$Re_d = V.d/\nu = 2.0.1/(477.10^{-6}) = 4200$$

Como Red > 2300, regime é turbulento em tubo com parede rugosa

Como calcular Nu para um escoamento turbulento com parede rugosa?

Analogia Chilton-Colburn

Para escoamentos TURBULENTOS em dutos RUGOSOS de seção circular ou não-circular pode-se empregar a analogia entre atrito e calor proposta por Chilton-Colburn:

$$\frac{f}{8} = \overline{St} \cdot Pr^{2/3}$$

f é o fator de atrito (diag. Moody) & St é o n. Stanton. St = Nu/(RePr). Substituindo a definição de St, encontra-se que:

$$\overline{Nu} = \frac{f}{8} \cdot Re_{dh} \cdot Pr^{1/3}$$

Note que Re_{dh} é calculado utilizando-se o diâmetro hidráulico, d_h = 4.área/perímetro

Nu para tubo liso, $d_h/L \rightarrow 0$ e regime turbulento Eq. 7-28

$$\overline{Nu} = 0.0214\left[\mathbf{Re}^{4/5} - 100\right]\mathbf{Pr}^{2/5}\left(1 + \left(\frac{d_h}{L}\right)^{2/3}\right) = 12.8$$

Nu para tubo rugoso e regime turbulento, *analogia de Chilton-Colburn* Eq. 7-31

$$\overline{Nu} = \frac{f}{8}\mathbf{Re} \cdot \mathbf{Pr}^{1/3} = 25.6$$

O fator de atrito é determinado pelo diagrama de Moody (Fig. 7-4), Re = 4200 e rugosidade relativa 0.02, $f = 0.055$

Note que o aumento da rugosidade provoca um aumento em Nu e, conseqüentemente no coef. transf. de calor

Ex. 7-42 A placa de circuito impresso tem uma temperatura uniforme de 115°C. Ar a 25°C circula através de canais de seção quadrada com velocidade média de 20m/s. Determine a taxa de transferência de calor em Watts!

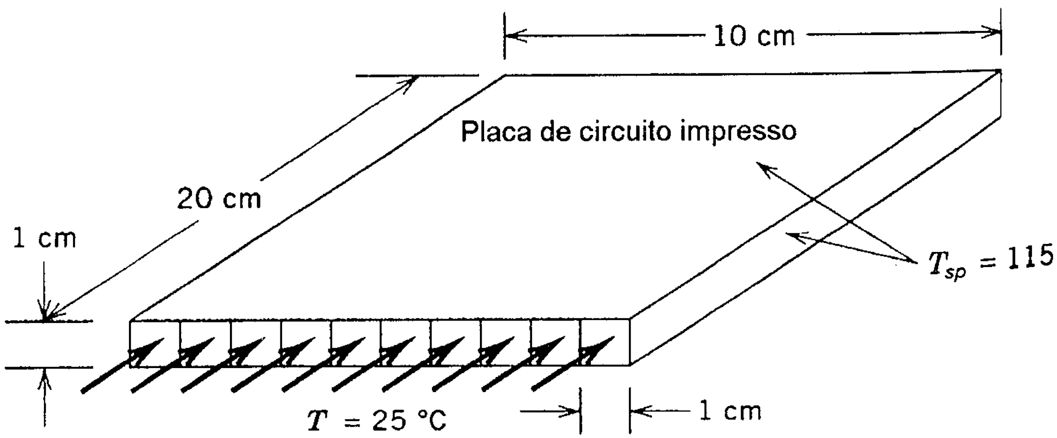


Figura P7-42 Sistema de resfriamento de uma placa de circuito impresso.

Propriedades avaliadas na temperatura média de mistura: (25+55)/2 ~ 40°C, isto foi um ['chute'](#)

Tabela A-8

Cp	ρ	ν	k	Pr
1006.8	1.1273	17.10^{-6}	27.10^{-3}	0.71

Ex. 7-42 O calor transferido é: $Q = m.Cp.(T_{ms} - T_{me})$

A vazão mássica que passa por cada canal é:

$$m = \rho.U.A_T = 1.12x20x1.10^{-4} = 0.002255 \text{ kg/s}$$

Mas para determinar Q ainda é necessário conhecer T_{ms}:

$$T_{ms} = T_p - \left(T_p - T_{me}\right) \cdot EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = \textbf{?}$$

Que por sua vez requer o conhecimento do coeficiente de transferência de calor médio.

Ex. 7-42 Para o canal quadrado, temos que sua área transversal, A_T, e o perímetro molhado, P são, respectivamente:

$$A_T = = 1.10^{-4}\ m^2 \quad \& \quad P = 0.04\ m$$

O diâmetro hidraulico: $d_h = 4.AT/P = 0.01$ m

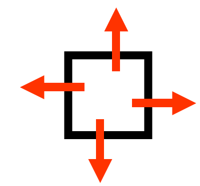
O Reynolds: $Re = U.d_h/\nu = 11800$ (turbulento)

O Nusselt médio Eq. 7.28, tubo liso $Nu = 36.2$

O coeficiente de transf. de calor, $h = 98.1\ W/m^2\ {}^oC$

Ex. 7-42 Se cada tubo troca calor pelas quatro faces (errado!) então a área de troca de calor (P.L) = 0.04x0.1, substituindo os outros valores na expressão abaixo vamos encontrar:

$$T_{ms} = T_p - \left(T_p - T_{me}\right) \cdot EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = 51.3\,^{o}C$$



O calor transferido por canal então fica:

Q = 0.002255.1006.(51.3-25) = 59.7 W

Como a placa possui 10 canais, então a taxa de calor removido é 597W

Ex. 7-42 O resultado bate com a resposta do livro *mas está errado*. Quem troca calor com o CI *é somente uma face*. Portanto a área de troca de calor (P.L) = 0.01x0.1, substituindo os outros valores na expressão abaixo vamos encontrar:

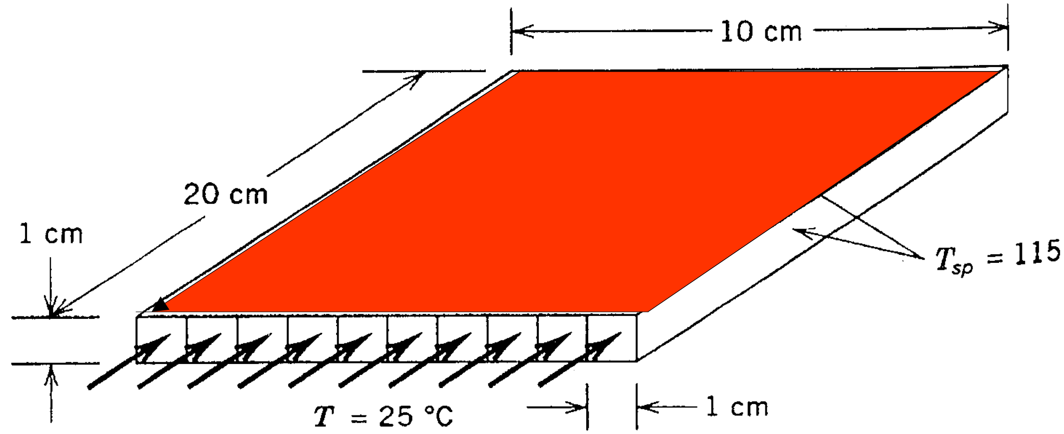
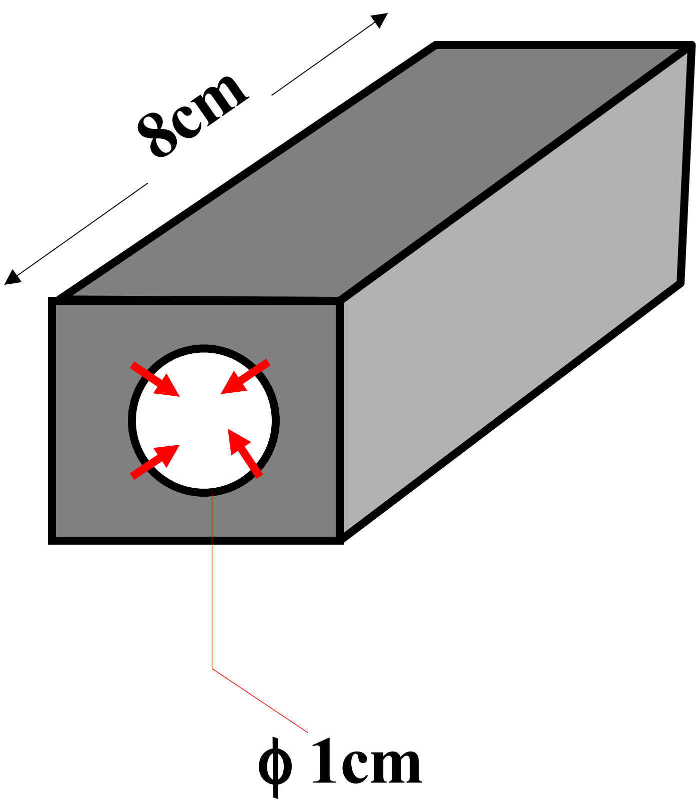


Figura P7-42 Sistema de resfriamento de uma placa de circuito impresso.

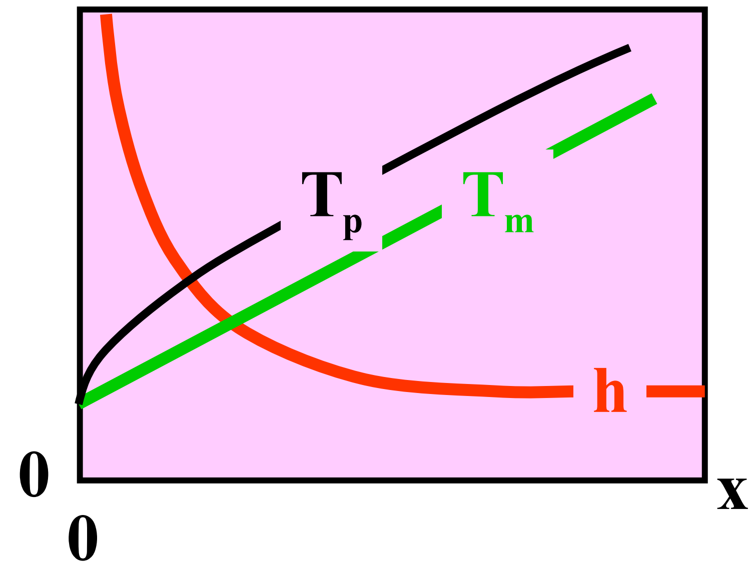
$$T_{ms} = T_p - \left(T_p - T_{me}\right) \cdot EXP\left(-\frac{\bar{h} \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p}\right) = 32.4\,^{o}C$$

O calor transferido por canal então fica:
Q = 0.002255.1006.(32.4-25) = 16.9 W
Como a placa possui 10 canais, então a taxa de calor removido é 169W

Ex. 7-32 Ar deve ser usado para resfriar um material sólido no qual ocorre geração interna de calor. Furos de 1cm de diâmetro foram feitos no material. A espessura da placa é de 8 cm e a condição térmica na superfície dos furos é do tipo *fluxo de calor constante*. O ar entra nos furos com uma velocidade média de 1.5 m/s e temperatura de 20°C. Estime a taxa de transferência de calor (Watts) removida pelo ar em cada furo se a temperatura máxima do material não exceder 200°C.

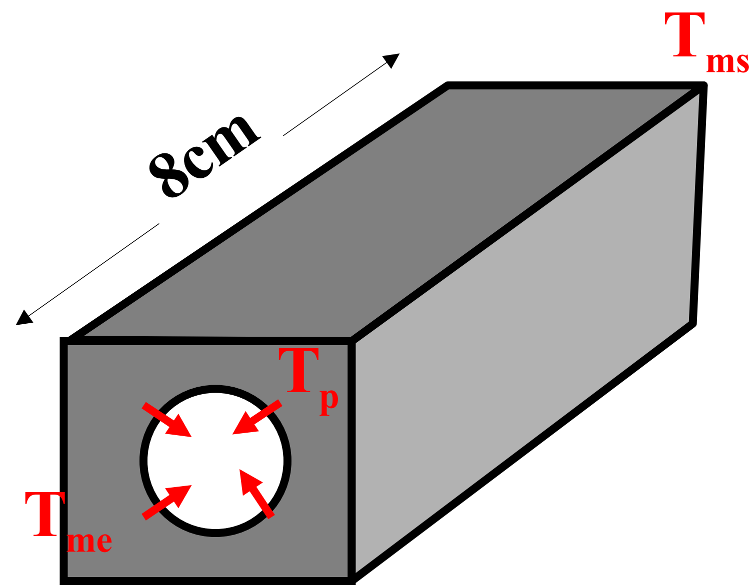


$$U = 1.5\ m/s$$
$$T_{m,e} = 20^oC$$
$$T_p < 200^oC$$



Note que Tp máximo vai ocorrer na saída do tubo!

- A relação entre T_{ms} e T_{me}



$$T_{ms} = \frac{\dot{q}_x'' \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{me}$$

- A relação entre T_{ms} e T_p

$$T_p = \frac{\dot{q}_x''}{h} + T_{ms}$$

- Obtendo uma relação entre T_{me} e T_p

$$T_p = \frac{\dot{q}_x''}{h} + \frac{\dot{q}_x'' \cdot P \cdot L}{\dot{m} \cdot C_p} + T_{me}$$

- As duas incógnitas são q” e h. Se calcularmos h, encontraremos q” da expressão acima

Cálculo do Nusselt Local

						Observação
diâmetro	d	m	0.01		0.01	
comprimento	L	m	0.08		0.08	
razão d/L	d/L	(---)	0.125		0.125	
Perímetro	P	m	0.031		0.031	
Area Transversal	At	m2	7.854E-05		7.854E-05	
Propriedades do ar	Prop Ar		30		40	
	cp	J/kgK	1006.4		1006.8	
	rho	kg/m3	1.1644		1.1273	
	ni	m2/s	1.60E-05		2.00E-05	
	k	W/mK	2.64E-02		2.71E-02	
	Pr	(---)	0.712		0.71	
velocidade entrada	U	m/s	1.5		1.5	
vazão mássica	m	kg/s	1.37E-04		1.33E-04	
Reynolds	Re	(---)	937		752	*Laminar*
Peclet (Re.Pr)	Pe	(---)	667.1		533.6	
	Pe(d/L)	(---)	83.4		66.7	*Desenvolvido Pe(d/L) < 1000*
Nusselt	Nu	(---)	4.36		4.36	*constante, Tab. 7.4*
coef. Transferência de calor	h	W/m2K	11.5		11.8	
	PL/mCp	m2K/W	1.82E-02		1.88E-02	
fluxo de calor	q"	W/m2	1712		1740	
taxa de calor	Q	W	4.3		4.4	
Temp. Mistura Saída	Tms	C	51		53	