Transferência de Calor

Escoamentos Externos

Camada Limite Térmica x Hidrodinâmica

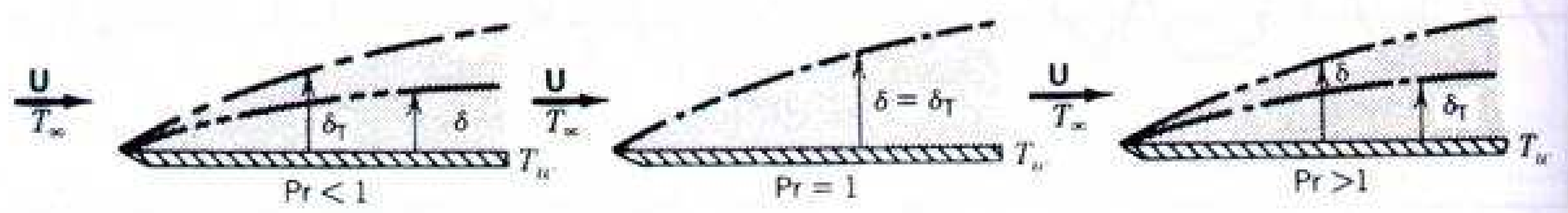


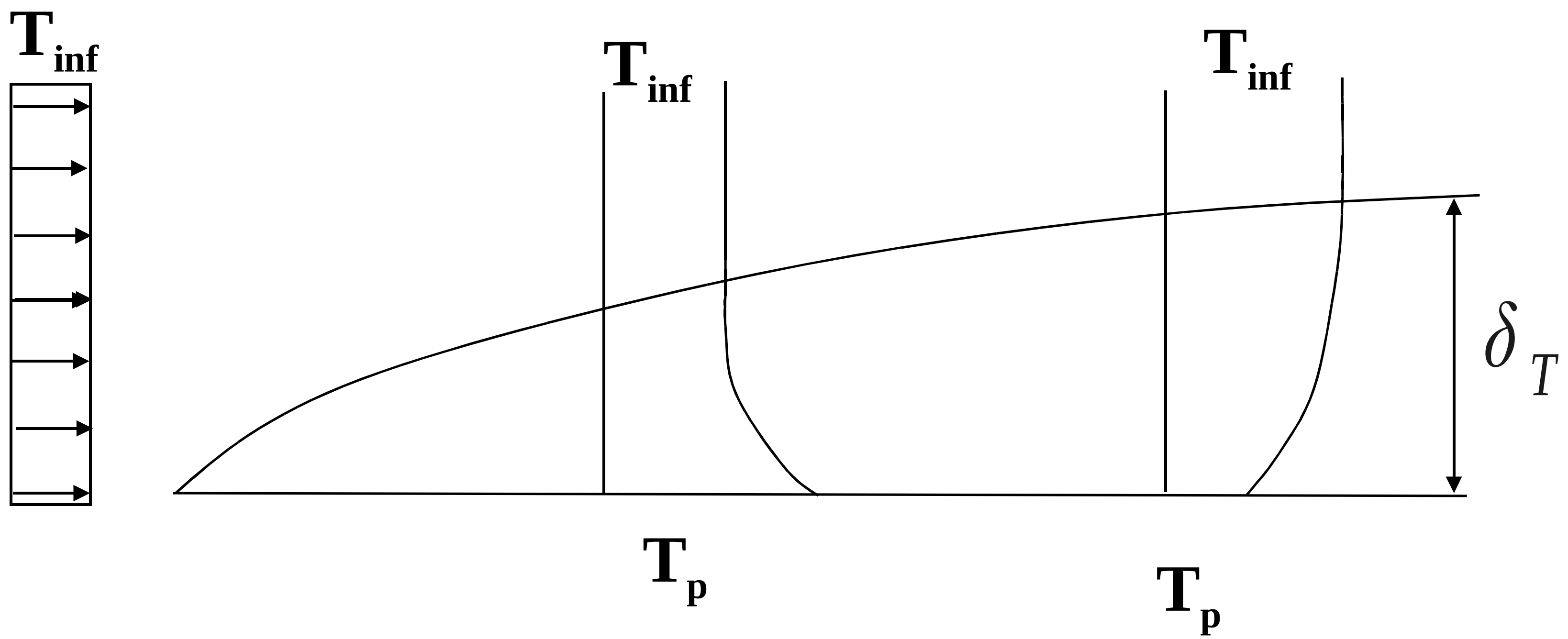
Figura 6-6 Camadas limites térmica e hidrodinâmica num escoamento sobre placa plana.

$$\frac{\delta_h}{\delta_T} = 1.026\,\mathrm{Pr}^{(1/3)}$$ Regime Laminar

$$\frac{\delta_h}{\delta_T} \simeq 1$$ Regime Turbulento

- **onde Pr é o número de Prandtl (adimensional)**
- **Pr = $\nu/\alpha = C_p\mu/k \sim \delta_h/\delta_T$**

Perfil de Temperatura: Aquecimento e Resfriamento



Aquecimento
Tp > Tinf

Resfriamento
Tp < Tinf

Calor e Coeficiente de Transferência de Calor

Coeficiente de transferência de calor local (h_x)

$$h_x = \frac{\dot{q}''}{\left(T_p - T_\infty\right)} = \frac{\left(\dot{Q}/A\right)}{\left(T_p - T_\infty\right)} \qquad \left[\frac{W}{m^2 C}\right]$$

Coeficiente de transferência de calor médio $\left(\bar{h}\right)$

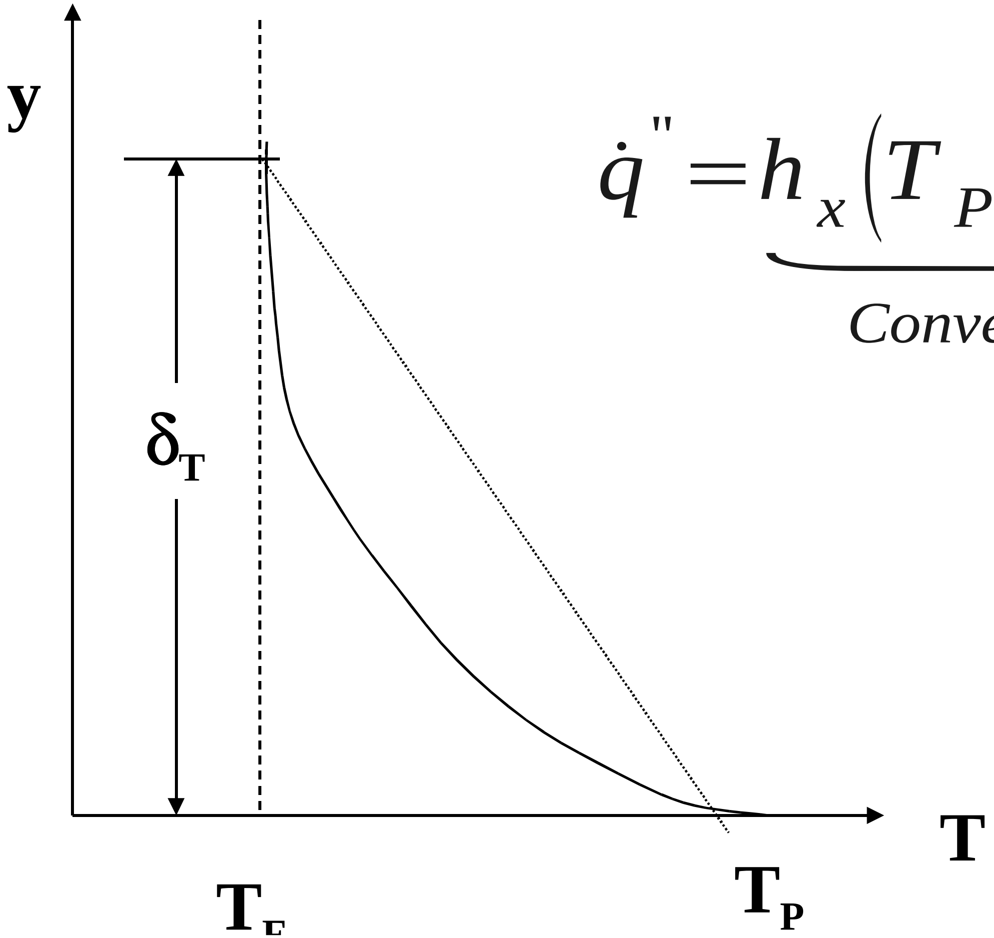
$$\bar{h} = \frac{\int_0^L h_x\, dx}{L} \rightarrow \dot{Q} = \bar{h}\, A \left(T_p - T_\infty\right)$$

O coef. Transf. Calor Local

- **O coeficiente de transferência de calor local expressa a razão entre o fluxo de calor na parede (W/m^2) e a diferença de temperatura entre a parede e o fluido (^{o}C)**

$$h_x = \frac{\dot{q}''}{\left(T_P - T_f\right)}$$

h é proporcional a quais parâmetros?



$$\dot{q}'' = \underbrace{h_x\left(T_P - T_f\right)}_{Convecção} \simeq \underbrace{\frac{k\cdot\left(T_P - T_f\right)}{\delta_T}}_{condução}$$

$$h_x \simeq \frac{k}{\delta_T}$$

- **O coeficiente de transferência de calor local é proporcional a condutibilidade térmica e inversamente proporcional a espessura da camada limite térmica!**

h é proporcional a quais parâmetros?

$$h_x \simeq \frac{k}{\delta_T} \simeq \frac{k}{\left(\delta_h / \Pr^n\right)} \simeq \frac{k}{\left(\mathrm{Re}^{-m} L / \Pr^n\right)}$$

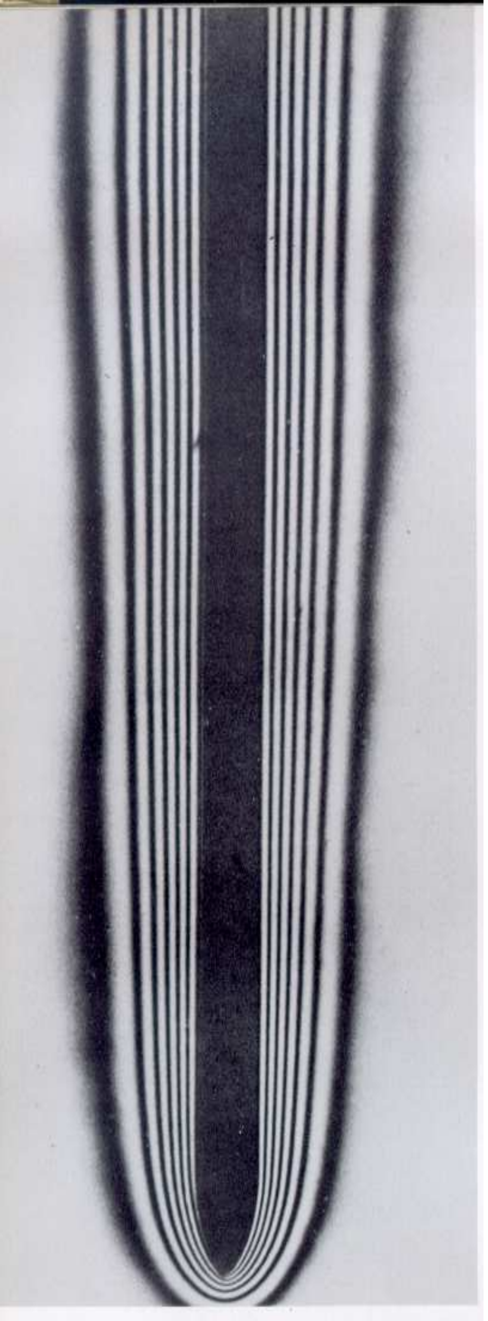
$$Nu_x = \frac{h_x L}{k} \simeq f\left(\mathrm{Re}, \Pr\right)$$

- **Para escoamentos forçados, o número de Nusselt pode ser expresso em função dos números de Reynolds e Prandtl**

Analogia entre Calor e Atrito

$$\frac{\overline{C}_f}{2} = \frac{\overline{h}}{\rho c_p U} \Pr^{2/3} = \overline{St} \cdot \Pr^{2/3}$$

- **<u>Chilton-Colburn</u> – válida para escoamento laminar numa placa plana e para escoamentos Turbulentos sobre superfícies planas ou com curvaturas.**



204. Free convection from a vertical plate. The plate is uniformly heated in air, producing a steady laminar flow. An interferogram shows lines of constant density which, at nearly constant pressure, are also isotherms. The Grashof number is approximately five million at a distance of 0.1 m from the lower end of the plate, so that the thermal boundary layer is rather thick. *Eckert & Soehngen 1948*

Convecção
Natural x Forçada

- **<u>Convecção Natural</u> – O fluido próximo a superfície é aquecido, sua densidade diminui e é estabelecido uma força de empuxo que o desloca para cima.**
- **A ação da gravidade cria um fluxo ascendente**
- **Convecção Forçada – a corrente local existe devido a outro fator (não é devido ao aquecimento local)**

GRUPOS ADIMENSIONAIS

Tabela 6-7 Resumo das correlações mais utilizadas para convecção natural e forçada sobre placas planas

Grupos Adimensionais		Número da Equação
Grashof	$Gr_x \dfrac{g\beta(T_p - T_\infty)x^3}{\nu^2}$	(6-48)
Nusselt	$Nu_x = \dfrac{h_x x}{k}$	(6-19)
Prandtl	$Pr = \dfrac{c_p \mu}{k}$	(6-3)
Rayleigh	$Ra_x = Gr_x Pr = \dfrac{g\rho^2 c_p \beta(T_p - T_\infty)x^3}{k\mu}$	(6-50)
Rayleigh (Fluxo de calor uniforme)	$Ra_x^* = \dfrac{g\rho^2 c_p \beta \dot{q}_p'' x^4}{\mu k^2}$	(6-58)

e β é o coeficiente de expansão do gás. $\beta = \dfrac{1}{T(K)}$ para gás perfeito (temp. Kelvin)

PLACA PLANA ISOTÉRMICA: CONVECÇÃO FORÇADA & NATURAL

Tabela 6-7 *Continuação*

Grupos Adimensionais			Número da Equação
Placa Plana Isotérmica			
Convecção forçada		**Propriedades avaliadas em Tinf**	
laminar			
$\mathbf{Re_x < 5.10^5}$	local	$Nu_x = 0{,}332 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(6-26)
	médio	$\overline{Nu} = 0{,}664 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}$	(6-30)
turbulento			
$\mathbf{5.10^3 < Re_x < 5.10^7}$	local	$Nu_x = \dfrac{0{,}0296 Re_x^{0,8} Pr}{1 + 2{,}185 Re_x^{-0,1}(Pr^{2/3} - 1)}$	(6-34)
$\overline{Nu} = \sqrt{Nu_T^2 + Nu_L^2}$	médio	$\overline{Nu} = \dfrac{0{,}037 Re_L^{0,8} Pr}{1 + 2{,}443 Re_L^{-0,1}(Pr^{2/3} - 1)}$	(6-37)
Convecção natural - placa isotérmica vertical		**Propriedades avaliadas em (Tp+Tinf)/2**	
laminar	local	$Nu_x = 0{,}68 + 0{,}503[Ra_x \psi(Pr)]^{1/4}$	(6-51)
	médio	$\overline{Nu}_x = 0{,}68 + 0{,}67[Ra_L \psi(Pr)]^{1/4}$	(6-52)
turbulento			
local e médio		$\overline{Nu}_x = Nu_x = 0{,}15[Ra_x \psi(Pr)]^{1/3}$	(6-54)
		$\psi(Pr) = \left[1 + \left(\dfrac{0{,}492}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-16/9}$	(6-53)
Convecção natural - placa isotérmica horizontal		**onde L = Área/Perímetro**	
face superior aquecida	$\overline{Nu}_L = 0{,}54 Ra_L^{1/4}$	$10^4 \le Ra_L \le 10^7$	(6-55)
	$\overline{Nu}_L = 0{,}15 Ra_L^{1/3}$	$10^7 \le Ra_L \le 10^{11}$	(6-56)
face inferior aquecida	$\overline{Nu}_L = 0{,}27 Ra_L^{1/4}$	$10^5 \le Ra_L \le 10^{10}$	(6-57)

PLACA PLANA Q constante:
CONVECÇÃO FORÇADA & NATURAL

Tabela 6-7 *Continuação*

Grupos Adimensionais			Número da Equação
Placa Plana com Fluxo de Calor Uniforme			
Convecção forçada			
laminar		$Nu_x = 0{,}46 Re_x^{1/2} Pr^{1/3}$	(6-44)
Turbulento: Eq. (6.34) local & Eq. (6.37) médio			
Convecção natural			
laminar	local	$Nu_x = 0{,}631[Ra_x^* \phi(Pr)]^{1/5}$	(6-59)
turbulento	local	$Nu_x = 0{,}241[Ra_x^* \phi(Pr)]^{1/5}$	(6-61)
		$\phi(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0{,}437}{Pr}\right)^{9/16}\right]^{-16/9}$	(6-62)

Limites de Transição Lam x Turb
Placa Plana

<u>Escoamento Forçado</u>

Placa Plana: Transição escoamento: $5x10^3 < Rex < 5x10^5$

Número de Nusselt Médio para escoamentos que incluem ambas as regiões:

$$\overline{Nu} = \sqrt{\overline{Nu}^2_{lam} + \overline{Nu}^2_{tur}}$$

desde que $5x10^3 < Rex < 5x10^7$ e $0.5 < Pr < 2000$.

Nestas condições: Nu_{lam} dado Eq. (6-30) e Nu_{tur} dado Eq. (6-37) .

<u>Convecção Natural</u>

Placa Plana Vertical

Transição laminar/ turbulenta $Ra > 10^9$.

Correlações p/ Cilindros e Esferas

Escoamento Forçado

Gnielinski fornece o número de Nusselt médio para outros objetos de formas variadas com temperatura de parede uniforme:

$$\overline{Nu} = \overline{Nu}_0 + \sqrt{\overline{Nu}^2_{lam} + \overline{Nu}^2_{tur}}$$

onde o comprimento característico L_c (Re e Nu) e Nu_0 são dados na tabela 6-5

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

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

Correlações p/ Cilindros e Esferas
Convecção Forçada

Para 1<Re_{Lc} < 10^5,

$Nu_L \rightarrow$ Eq. (6-30) e $Nu_T \rightarrow$ Eq. (6-37) desde que 0.6 < Pr < 1000

Para Re_{Lc} < 1

$$\overline{Nu} = 1.01 \cdot \left(\mathrm{Re}_{Lc} \mathrm{Pr} \right)^{(1/3)}$$

Fios, cilindros e tubos (externos):

$$\overline{Nu} = 0.75 \left(\mathrm{Re}_{Lc} \mathrm{Pr} \right)^{(1/3)}$$

Esferas:

Correlações p/ Cilindros e Esferas Convecção Natural

Churchil propôs uma correlação geral para cálculo do coef. transf. Calor em convecção natural para objetos de formas variadas. A correlação é válida em ambas as regiões: laminar e turbulenta

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

$$\xi(\text{Pr}) = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.5}{\text{Pr}} \right)^{(9/6)} \right]^{(16/9)}}$$

O comprimento característico L_C (Ra e Nu) e Nu0 são dados na Tabela 6-6

Correlações p/ Cilindros e Esferas
Convecção Natural

O comprimento característico L_C (Ra e Nu) e Nu0 são dados na Tabela 6-6

Tabela 6-6 Parâmetros usados na eq. 6-63 para convecção natural.[6] 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	πd	$0{,}36\pi$
Cone	$4L/5$	0,54
Esfera	$\pi d/2$	π
Esferóide	$3\pi V/A$	$A^3/36V^2$

L é medido ao longo da superfície

6-22 Um fluido escoa sobre uma placa plana isotérmica. O comprimento da placa é ajustado de forma que o número de Reynolds na extremidade final seja 5×10^3 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 ^oC.

(b) Água a 50 ^oC.

(c) Óleo a 140 ^oC.

6-23 Um vento frio, - 20 ^oC, escoa numa direção aproximadamente horizontal através da parede lateral de uma casa na velocidade de 8 m/s. A lateral da casa tem 3 m de altura e 10 m de comprimento. Há várias janelas nessa lateral de forma que a superfície pode ser considerada como "completamente rugosa". A temperatura da superfície da casa é 5 ^oC.

(a) Estime o coeficiente de transferência de calor por convecção utilizando a analogia de Chilton-Colburn.

(b) Calcule a taxa de transferência de calor da lateral da casa.

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

6-26 Um fluido a 20 ^{o}C escoa sobre uma placa plana de 50 cm de comprimento na velocidade de 2 m/s. Determine o coeficiente médio de transferência de calor por convecção para os seguintes fluidos:

(a) Ar.

(b) Água.

6-29E Considere que a mão estendida de uma pessoa seja equivalente a uma placa plana com temperatura de superfície de 80 ^{o}F. A mão tem 3,5 in. de largura e 7,0 in. de comprimento com área total de 49 in^{2}. A mão está estendida paralelamente à direção do escoamento e o fluido escoa 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 ^{o}F.

(b) A mão é mantida numa corrente de montanha com velocidade de 6 in./s na temperatura de 50 ^{o}F.