

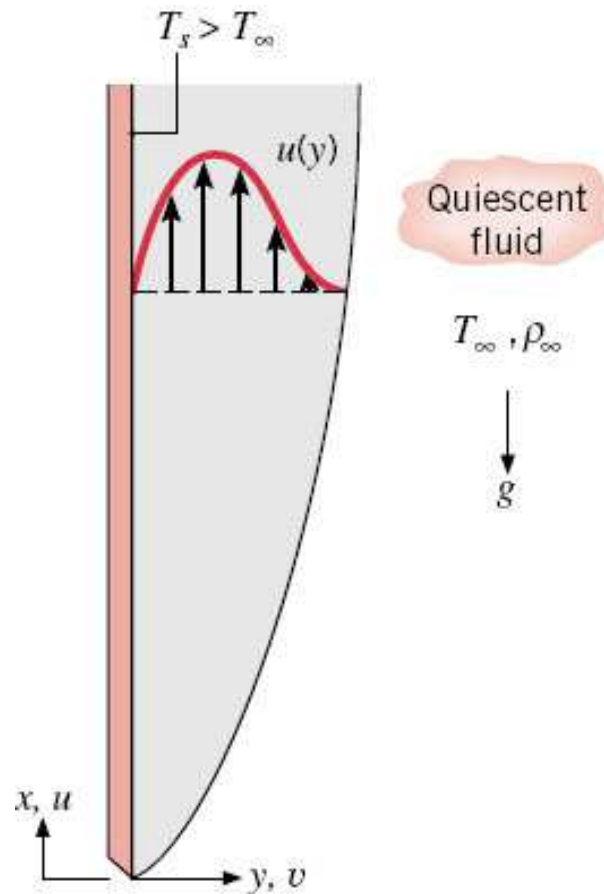
CAPÍTULO 4 – CONVECÇÃO NATURAL

Prof. Dr. Santiago del Rio Oliveira

- Surge quando uma **força de corpo** atua sobre um fluido na qual existem **gradientes de massa específica**. O efeito líquido é uma **força de empuxo**, que induz **correntes de convecção natural**.
- A taxa de transferência de calor na convecção natural é **menor** do que na convecção forçada (menores velocidades de escoamento).
- Situação comum: escoamento de convecção natural limitado por uma superfície, tal como uma placa vertical aquecida.
- Na convecção natural surge um **coeficiente de expansão volumétrica**:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$$

- Para um gás ideal, $\beta = 1/T(K)$ e para líquidos β pode ser lido no Apêndice A.

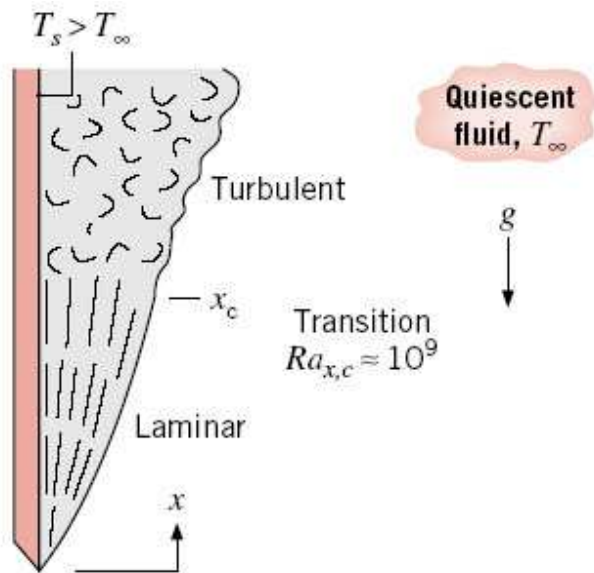


- $T_s > T_\infty$ (fluido extenso e quiescente)
- O fluido próximo da placa é menos denso e sobe, arrastando fluido da região quiescente.
- É possível $T_s < T_\infty$ (movimento descendente)
- Em $y = 0$ e $y \rightarrow \infty$ a velocidade é zero.

- Define-se o **número de Grashof**:
$$\text{Gr}_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2}$$

- O número de Grashof exerce na convecção natural o mesmo papel que o número de Reynolds exerce na convecção forçada, ou seja, espera-se que $Nu_L = f(Gr_L, Pr)$.

- Número de Grashof = $\frac{\text{forças de empuxo}}{\text{forças de inércia}}$



- Turbulência pode ocorrer por instabilidades fluidodinâmicas.

- Para placas verticais

$$Ra_{x,c} = Gr_{x,c} Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)x^3}{\nu\alpha} \approx 10^9$$

CORRELAÇÕES EMPÍRICAS: CONVECÇÃO NATURAL EM ESCOAMENTO EXTERNOS

- As propriedades são estimadas em $T_f = (T_s + T_\infty)/2$.

A placa vertical

- Correlação de Churchill e Chu (todo o intervalo de Rayleigh)

$$\overline{\text{Nu}}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \text{Ra}_L^{1/6}}{[1 + (0,492/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

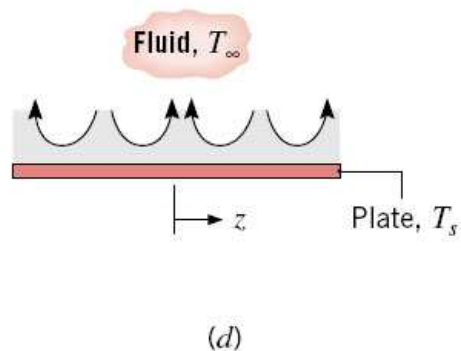
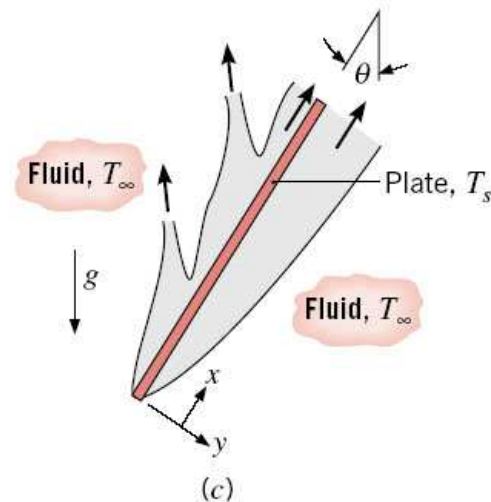
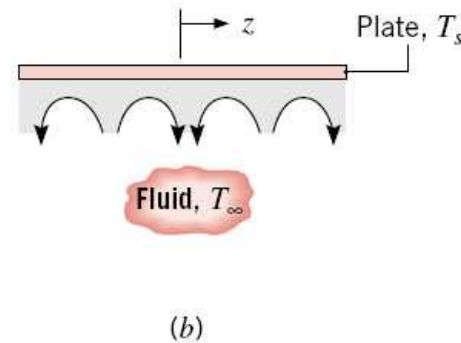
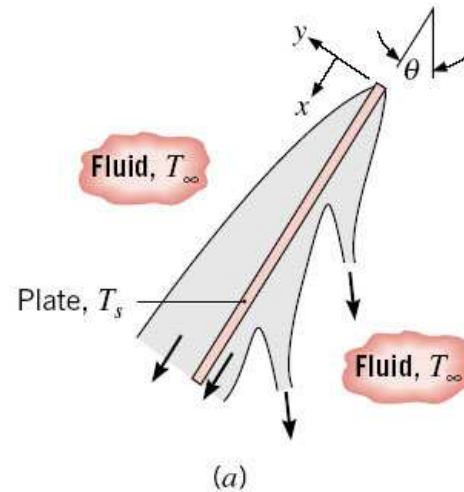
- Para escoamento laminar (melhor precisão):

$$\overline{\text{Nu}}_L = 0,68 + \frac{0,670 \text{Ra}_L^{1/4}}{[1 + (0,492/\text{Pr})^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{Ra}_L \leq 10^9$$

- As duas correlações acima são válidas para **placas isotérmicas** (T_s constante). Para placas com **fluxo de calor constante**, correlações devem ser procuradas na literatura.

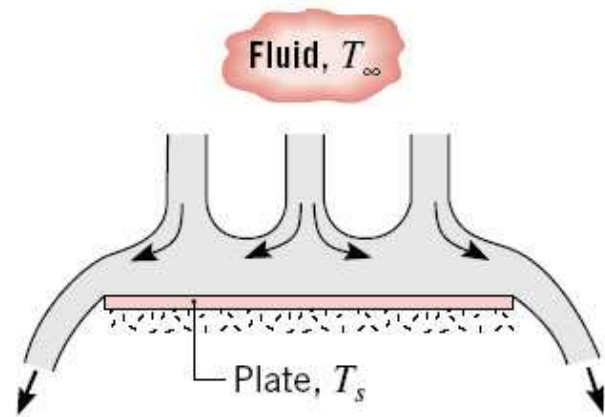
Placas inclinadas e horizontais

- Para superfície superior e inferior de placas inclinadas resfriadas e aquecidas, respectivamente, e para $0 \leq \theta \leq 60^\circ$, g deve ser substituído por $g \cos \theta$ nas correlações de placa vertical para $\overline{Nu}_L$.
- Para condições térmicas opostas, a literatura deve ser consultada.

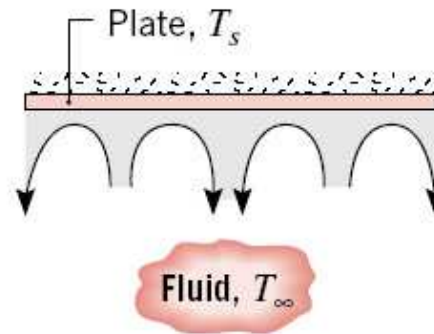


Escoamento movidos pelo empuxo em uma placa inclinada:

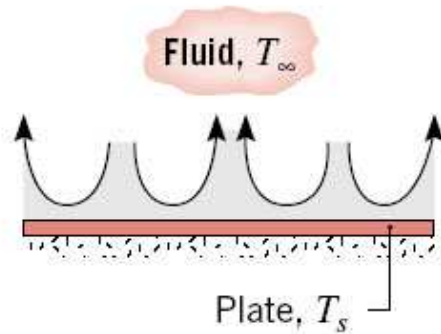
(a) vista lateral de escoamento nas superfícies superior e inferior de uma placa fria ($T_s < T_\infty$), (b) vista da extremidade do escoamento na superfície inferior de uma placa fria, (c) vista lateral de escoamentos nas superfícies superior e inferior de uma placa quente ($T_s > T_\infty$), e (d) vista da extremidade do escoamento na superfície superior de uma placa quente.



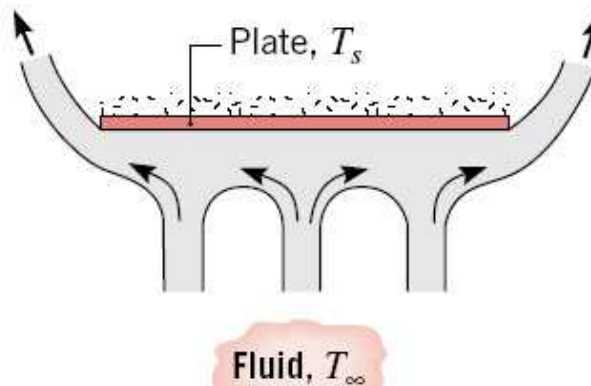
(a)



(b)



(c)



(d)

Escoamentos movidos
pelo empuxo em placas
horizontais frias ($T_s < T_\infty$)
e quentes ($T_s > T_\infty$):

(a) superfície superior de
placa fria, (b) superfície
inferior de placa fria, (c)
superfície superior de
placa quente, e (d)
superfície inferior de
placa quente.

- Para **placas horizontais**, deve-se calcular o comprimento característico:

$$L = \frac{A_s \text{ (área superficial da placa)}}{P \text{ (perímetro da placa)}}$$

- **Superfície superior de uma placa aquecida ou superfície inferior de uma placa resfriada:**

$$\overline{\text{Nu}}_L = 0,54 \text{Ra}_L^{1/4} \quad (10^4 \leq \text{Ra}_L \leq 10^7)$$

$$\overline{\text{Nu}}_L = 0,15 \text{Ra}_L^{1/3} \quad (10^7 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{11})$$

- **Superfície inferior de uma placa aquecida ou superfície superior de uma placa resfriada:**

$$\overline{\text{Nu}}_L = 0,27 \text{Ra}_L^{1/4} \quad (10^5 \leq \text{Ra}_L \leq 10^{10})$$

O cilindro horizontal longo

- Correlação de Morgan (1975):

$$\overline{\text{Nu}}_D = \frac{\bar{h}D}{k} = C\text{Ra}_D^n$$

Ra_D	C	n
$10^{-10}-10^{-2}$	0.675	0.058
$10^{-2}-10^2$	1.02	0.148
10^2-10^4	0.850	0.188
10^4-10^7	0.480	0.250
10^7-10^{12}	0.125	0.333

- Correlação de Churchill e Chu (1975):

$$\overline{\text{Nu}}_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387 \text{Ra}_D^{1/6}}{[1 + (0,559/\text{Pr})^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad \text{Ra}_D \leq 10^{12}$$

Esferas

- Correlação de Churchill (2002) válida para $\text{Pr} \geq 0,7$ e $\text{Ra}_D \leq 10^{11}$:

$$\overline{\text{Nu}}_D = 2 + \frac{0,589 \text{Ra}_D^{1/4}}{[1 + (0,469/\text{Pr})^{9/16}]^{4/9}}$$

TABLE 9.2 Summary of free convection empirical correlations for immersed geometries

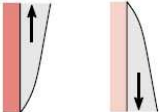
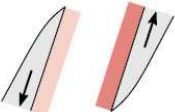
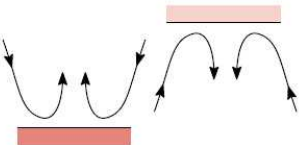
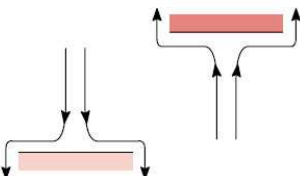
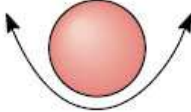
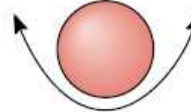
Geometry	Recommended Correlation	Restrictions
1. Vertical plates^a 	Equation 9.26	None
2. Inclined plates Cold surface up or hot surface down 	Equation 9.26 $g \rightarrow g \cos \theta$	$0 \leq \theta \leq 60^\circ$
3. Horizontal plates (a) Hot surface up or cold surface down 	Equation 9.30 Equation 9.31	$10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7$ $10^7 \lesssim Ra_L \lesssim 10^{11}$
(b) Cold surface up or hot surface down 	Equation 9.32	$10^5 \lesssim Ra_L \lesssim 10^{10}$

TABLE 9.2 *Continued*

Geometry	Recommended Correlation	Restrictions
4. Horizontal cylinder 	Equation 9.34	$Ra_D \lesssim 10^{12}$
5. Sphere 	Equation 9.35	$Ra_D \lesssim 10^{11}$ $Pr \gtrsim 0.7$