



CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À CONVECÇÃO

Prof. Dr. Santiago del Rio Oliveira

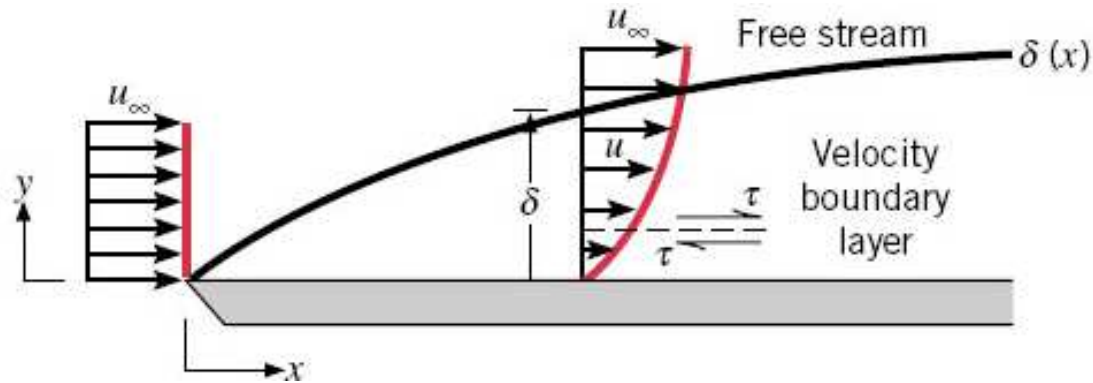
- Transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento sobre essa superfície.
- Inclui transferência de energia pela movimento global do fluido (advecção) e pelo movimento aleatório das moléculas do fluido (difusão).
- Na análise de convecção, tem-se dois objetivos principais:
 1. Adquirir compreensão dos mecanismos físicos que embasam a transferência por convecção.
 2. Desenvolver meios para executar cálculos envolvendo a transferência por convecção.

1.1 AS CAMADAS-LIMITE DA CONVECÇÃO

- Conceito essencial para o entendimento do fenômeno da convecção.

1.1.1 A camada-limite de velocidade

- Considere o escoamento sobre uma placa plana conforme figura abaixo.
- A velocidade do fluido varia desde zero na superfície até u_{∞} a uma distância $y = \delta$.
- Esse **retardamento** da velocidade do fluido está relacionado as **tensões de cisalhamento** τ que atuam em planos que são paralelos à velocidade do fluido.
- Com o aumento de y , a componente x da velocidade do fluido, u , aumenta até atingir u_{∞} .



- δ é a **espessura da camada-limite de velocidades**, definida como o valor de y para o que $u = 0,99u_\infty$.
- Existem duas regiões distintas no escoamento:
 1. Uma fina camada de fluido (camada-limite) na qual existem **gradientes de velocidade e tensões de cisalhamento**.
 2. Uma região fora da camada-limite, na qual **gradientes de velocidade e tensões cisalhantes são desprezíveis**.

- A importância da camada-limite de velocidades é a **tensão de cisalhamento na superfície** τ_s , e, portanto, os efeitos do **atrito na superfície**.
- O **arrasto viscoso na superfície** pode ser calculado pelo **coeficiente de atrito local**:

$$C_f = \frac{\tau_s}{\rho u_\infty^2 / 2}$$

- Para um **fluido Newtoniano**, a **tensão de cisalhamento na superfície** pode ser calculada como:

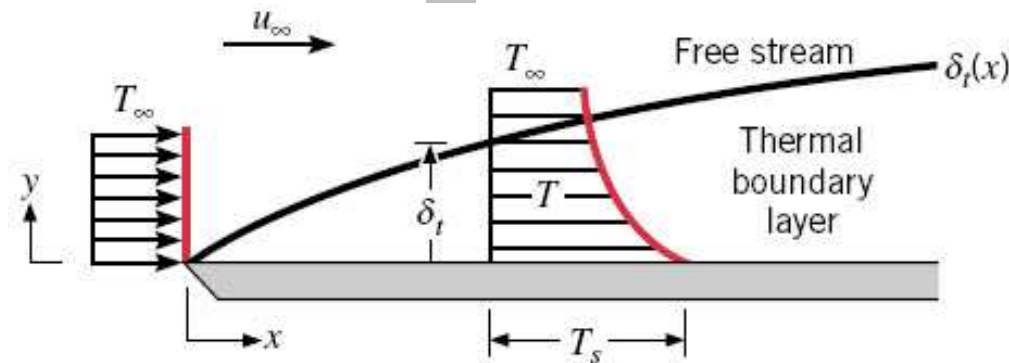
$$\tau_s = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0}$$

- A tensão cisalhante na superfície e o coeficiente de atrito **dependem** de x .

- Com o aumento de x , os efeitos da viscosidade penetram cada vez mais na corrente livre e a camada-limite de velocidades aumenta.

1.1.2 A camada-limite térmica

- Uma camada-limite térmica se desenvolve quando houver diferença de temperaturas do fluido na corrente livre e da superfície.
- A temperatura do fluido varia de T_s a T_∞ .



- Essa variação de temperatura é devido a troca de energia entre camadas de fluido adjacentes.

- A região do escoamento onde existe **gradiente de temperaturas** é a **camada-limite térmica**, cuja espessura é δ_t .
- δ_t é o valor de y no qual a razão $[(T_s - T)/(T_s - T_\infty)] = 0,99$.
- Em qualquer posição x , o **fluxo térmico na superfície local** pode ser obtido aplicando-se a **lei de Fourier no fluido**, ou seja:

$$q_s'' = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$$

- Essa expressão é apropriada porque na superfície **não há movimento de fluido** e a transferência de energia se dá unicamente por **condução**.
- Da lei do resfriamento de Newton: $q_s'' = h(T_s - T_\infty)$

- Combinando as duas equações anteriores obtém-se:

$$h = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{T_s - T_\infty}$$

- δ_t cresce com o aumento de x , mas como $h > 0$, $\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}$ diminui com x , assim como q_s'' e h .
- Com o aumento de x , os efeitos da transferência de calor penetram cada vez mais na corrente livre e a camada-limite térmica cresce.

1.1.3 Significado das camadas-limite

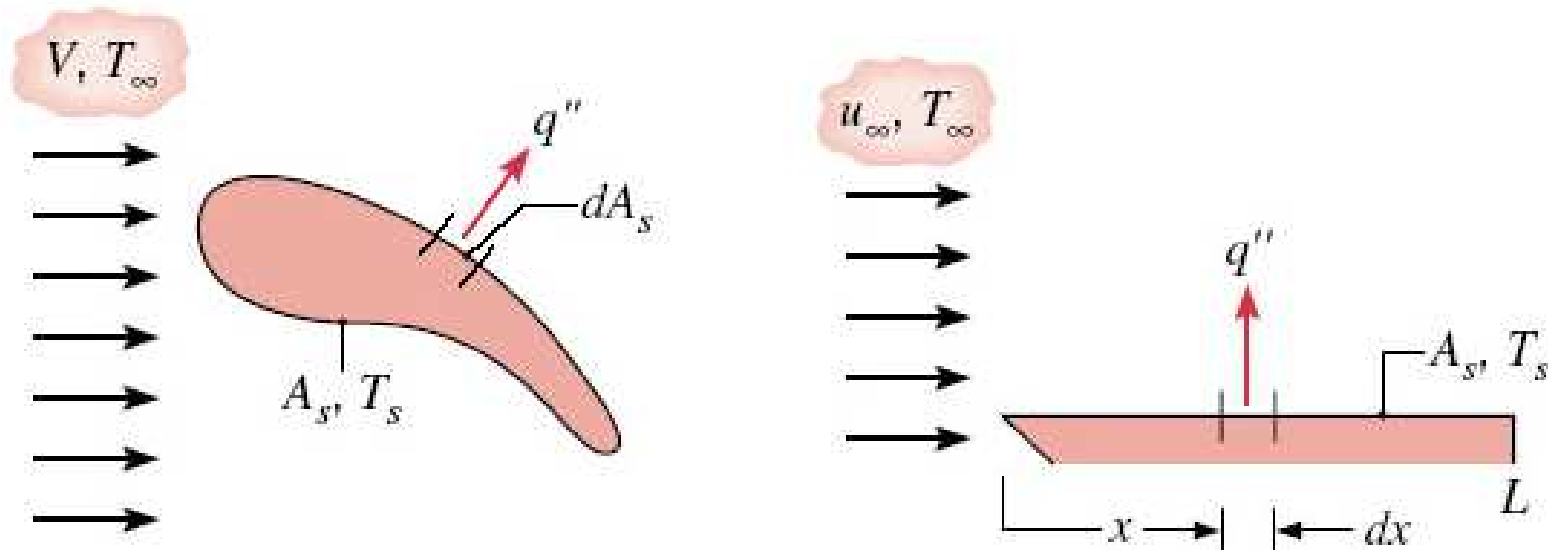
- A camada-limite de velocidades tem espessura $\delta(x)$ e é caracterizada pela presença de gradientes de velocidade e tensões de cisalhamento.

- A **camada-limite térmica** tem espessura $\delta_t(x)$ e é caracterizada pela presença de **gradientes de temperatura** e pela **transferência de calor**.
- Raramente as camadas-limite crescem na mesma taxa e os valores de δ e δ_t em uma dada posição não são os mesmos.
- **Efeito de δ** : atrito superficial e coeficiente de atrito C_f .
- **Efeito de δ_t** : transferência de calor por convecção e coeficiente de transferência de calor por convecção h .

1.2 COEFICIENTES CONVECTIVO LOCAL E MÉDIO

- Um fluido com velocidade V e temperatura T_∞ escoa sobre uma superfície de forma arbitrária de área superficial A_s e temperatura superficial T_s uniforme.

- Se $T_s \neq T_\infty$ ocorrerá transferência de calor por convecção.
- Sabe-se que q'' e h variam ao longo da superfície.



- A taxa total de transferência de calor q é obtida pela integração do fluxo local ao longo de toda a superfície:

$$q = \int_{A_s} q'' dA_s$$

- Substituindo $q'' = h(T_s - T_\infty)$ na equação anterior obtém-se:

$$q = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h dA_s$$

- Definindo um **coeficiente convectivo médio** $\bar{h}$ para toda a superfície, a **taxa total de transferência de calor por convecção** pode ser escrita como:

$$q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty)$$

- Igualando as duas expressões anteriores obtém-se uma relação entre os **coeficientes convectivos médio e local** na forma:

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h dA_s$$

- Para o caso particular do **escoamento sobre uma placa plana**, h varia com a distância x e a equação anterior se reduz a:

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h dx$$

1.2.3 O problema da convecção

- A determinação dos **coeficientes convectivo local** (h) e **médio** ($\bar{h}$) é visto como o problema da convecção.
- Essa determinação não é simples pois depende:
 1. **Propriedades do fluido:** ρ, μ, k, c_p .
 2. **Geometria da superfície.**
 3. **Condições de escoamento.**
- Isso facilita o cálculo do **fluxo local** ou **taxa de transferência total**.

1.3 ESCOAMENTOS LAMINAR E TURBULENTO

- Inicialmente é importante definir se a camada-limite é **laminar** ou **turbulenta**.
- O **atrito superficial** e as **taxas de transferência por convecção** dependem fortemente dessas condições.

1.3.1 Camadas-limite de velocidade laminar e turbulenta

- O movimento do fluido é caracterizado por componentes da velocidade nas direções x e y .
- A figura abaixo mostra que há **diferenças marcantes** entre as condições de escoamento laminar e turbulento.
- **Camada-limite laminar:**

- 1 O movimento do fluido é altamente ordenado.

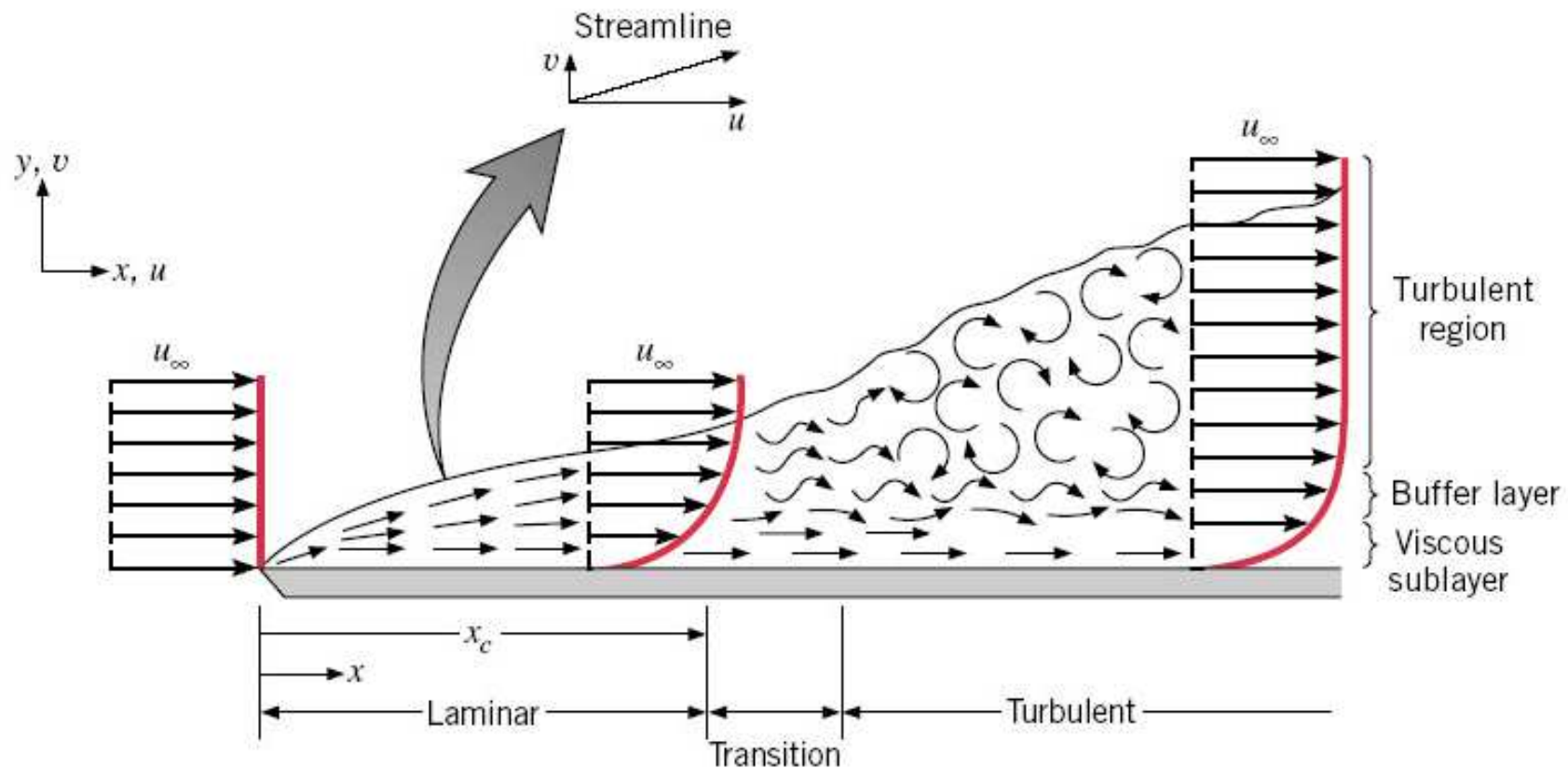
- 2 δ aumenta com o aumento de x .
- 3 $\partial u / \partial y|_{y=0}$ diminui com o aumento de x .
- 4 τ_s diminui com o aumento de x .

- Camada-limite de transição:

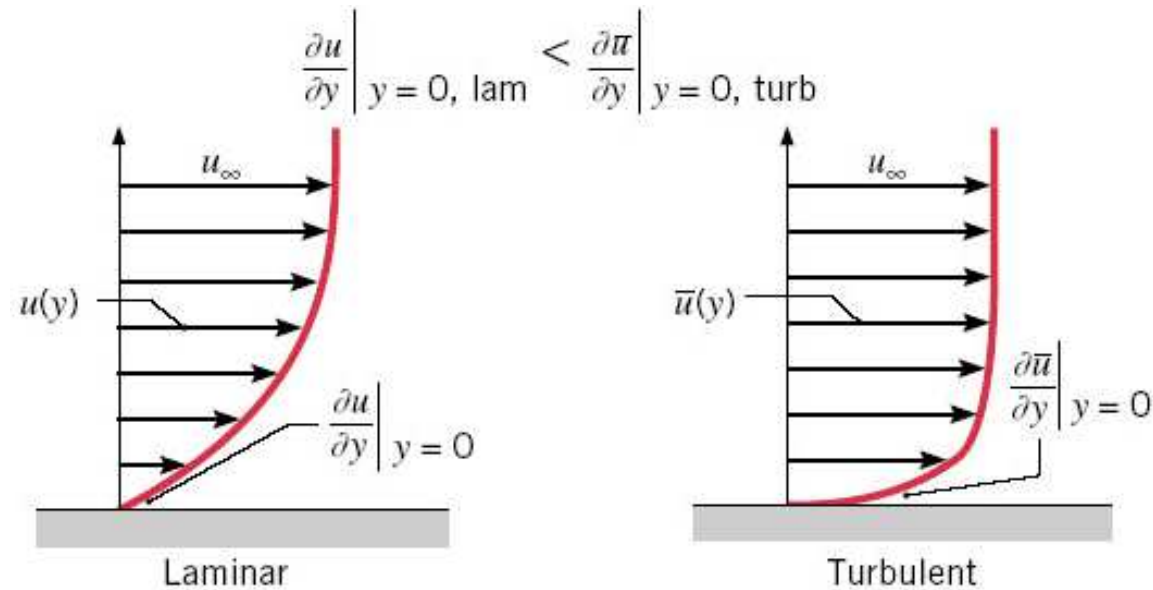
- 1 Condições que mudam com o tempo.
- 2 Escoamento com características ora laminares ora turbulentas.

- Camada-limite turbulenta:

- 1 Escoamento irregular.
- 2 Movimento tridimensional aleatório.
- 3 Escoamento caótico e irregular com flutuações de pressão e velocidades.
- 4 Distingue-se 3 regiões distintas: subcamada viscosa (viscous sublayer), camada de amortecimento (buffer layer) e zona turbulenta (turbulent region).



- O gradiente de velocidades na superfície é **maior no escoamento turbulento do que no escoamento laminar**. Isso implica maiores valores de τ_s .
- Transição pode ser induzida por **rugosidade superficial** ou **vibração superficial**.



- A transição é função de um **adimensional** chamada de **número de Reynolds**:

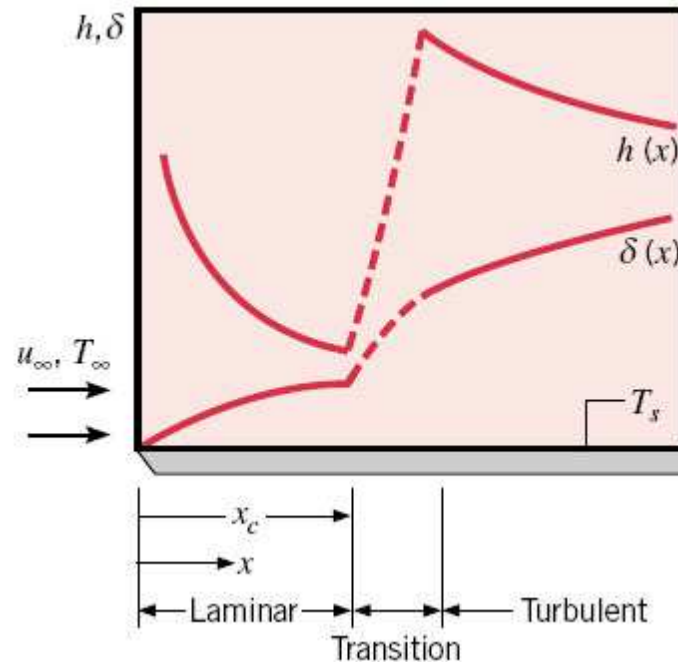
$$\text{Re}_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

- Por questões didáticas, é razoável supor que a transição ocorre num local x_c .
- Para **escoamento sobre uma placa plana**, o número de Reynolds crítico é:

$$\text{Re}_{x,c} = \frac{\rho u_{\infty} x_c}{\mu} = 5 \times 10^5$$

1.3.2 Camada-limite térmica laminar e turbulenta

- A **distribuição de velocidades** é importante na determinação do **transporte de energia térmica**.
- Assim, a **natureza do escoamento** tem forte influência nas **taxas de transferência de calor**.
- δ_t **aumentam** com o **aumento** de x .
- $\partial T / \partial y|_{y=0}$ **diminuem** com o **aumento** de x .
- h **diminuem** com o **aumento** de x .



- Na **transição** verifica-se um **aumento** no coeficiente de transferência de calor, com posterior queda.
- Como a turbulência induz a mistura, diferenças nas espessuras das camadas-limite de velocidade e térmica são menores no escoamento turbulento do que no laminar.