Transferência de Calor por Convecção

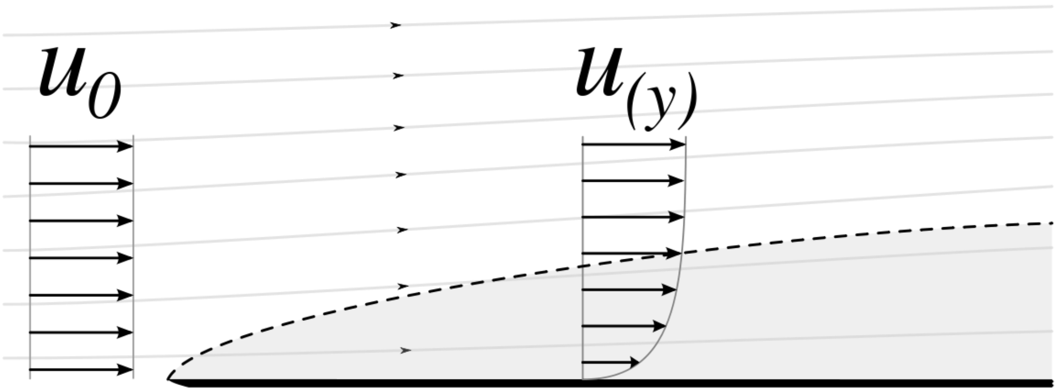
Um seminário por Luiz Gabriel Bandeira, Lucca Passos e Elias Junior.

A Camada Limite de Velocidade

Para entendermos o conceito de camada limite de velocidade, consideramos um fluido em regime de escoamento em contato com uma superfície sólida. Para a completa compreensão, incluem-se os conceitos de:

- Condição de não deslizamento
- Força de cisalhamento

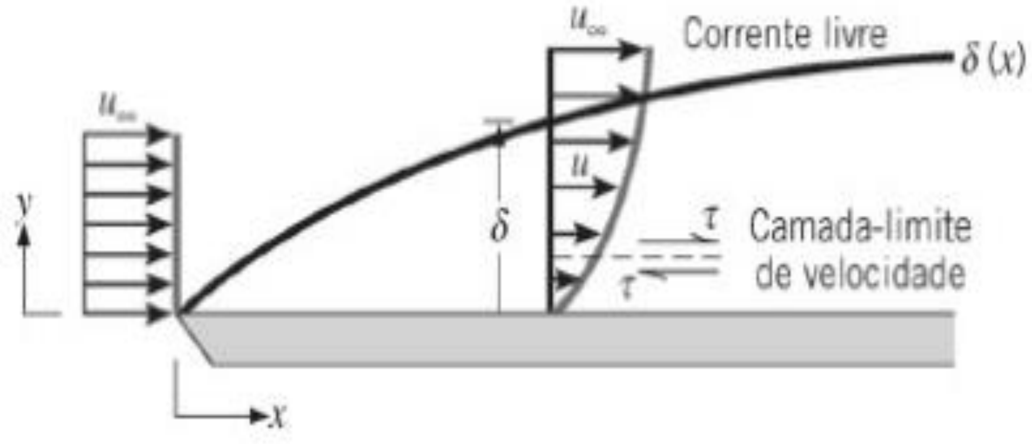
Na camada do fluido adjacente à superfície sólida, ocorre um fenômeno denominado **condição de não deslizamento**, onde tal camada, por conta do atrito viscoso, atinge uma velocidade relativa em relação à superfície igual a zero, ou seja, ambos passam a ter a mesma velocidade, dando a impressão de que o fluido gruda na mesma.



Dessa forma, para a maioria das situações, podemos supor a velocidade das partículas próximas à superfície como zero. Essas partículas atuam, então, no retardamento do movimento das partículas na camada de fluido adjacente, que atuam no retardamento do movimento das partículas da próxima camada e assim sucessivamente, gerando dessa forma, um gradiente de velocidade.

Esse retardamento é ocasionados pelas **tensões de cisalhamento**, denotadas pela letra grega τ, que atuam em planos que são paralelos à velocidade do fluido.

A medida que nos afastamos da superfície sólida, os efeitos das tensões cisalhantes, geradas pela condição de não deslizamento, vão diminuindo até que se tornam desprezíveis. A região onde tais efeitos podem ser desconsiderados é denominada de **região de escoamento livre**. enquanto a camada em que os mesmos efeitos são significativos, é denominada **camada limite de velocidade**.



A grandeza δ representada no diagrama é chamada de espessura da camada-limite e é, tipicamente, definida como o valor de y (distância da superfície até uma determinada camada do fluido) para o qual a velocidade é 99% da velocidade de escoamento livre.

O perfil de velocidades na camada-limite se refere à maneira como u varia com y através da camada-limite.

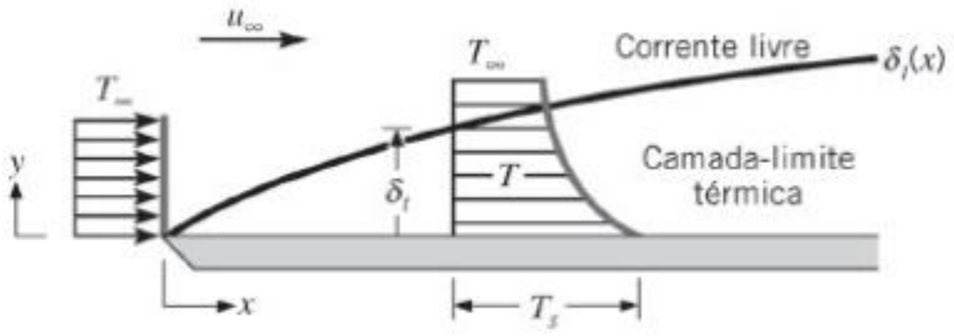
Com o aumento da distância da aresta frontal da placa, os efeitos da viscosidade penetram cada vez mais na corrente livre e a camada-limite aumenta (δ aumenta com x)

A Camada Limite Térmica

Da mesma forma que uma camada limite de velocidade se forma quando há o escoamento de um fluido sobre uma superfície, uma camada limite de temperatura irá se desenvolver quando houver diferença entre as temperaturas do fluido na corrente de escoamento livre e a corrente da superfície.

Portanto, analogamente ao estudo da camada limite da velocidade, podemos definir um estudo sobre um escoamento de um fluido sobre uma superfície isotérmica, para entender a camada limite térmica.

As partículas, na aresta frontal, possuem um perfil de temperatura uniforme, porém quando as mesmas entram em contato com a superfície, entram em equilíbrio térmico na temperatura da superfície da placa. Por sua vez, essas partículas trocam energia com as da camada de fluido adjacente e assim por diante, havendo o desenvolvimento de gradientes de temperatura no fluido.



A região do fluido na qual há esses gradientes de temperatura é definida como a **camada limite térmica.**

Com o aumento da distância a partir da aresta frontal, os efeitos da transferência de calor penetram cada vez mais na corrente livre e a camada-limite térmica cresce.

Portanto, podemos traçar uma relação entre a velocidade μ no estudo da camada limite de velocidade com a temperatura T, no estudo relacionado a camada limite de temperatura.

Significado das Camadas

De maneira geral, para todo escoamento sobre qualquer superfície, existirá uma camada limite de velocidade e, portanto, atrito na superfície. Da mesma forma, existirá uma camada limite de temperatura e, assim, transferência de calor por convecção sempre estarão presentes se houver diferença entre as temperaturas na superfície e na região de escoamento livre.

A camada-limite de velocidade tem uma espessura $\delta(x)$ e é caracterizada pela presença de gradientes de velocidade e de tensões cisalhantes. De maneira semelhante, a camada-limite térmica apresenta uma espessura $\delta t(x)$ e é caracterizada por gradientes de temperatura e pela transferência de calor.

Dessa forma, para um engenheiro, as principais manifestações das camadas citadas se dá, respectivamente, pelo atrito superficial e a transferência de calor por convecção, havendo uma relação de extrema importância com os seguintes parâmetros chaves:

- Coeficiente de Atrito (C_f)
- Coeficiente de transferência de calor por convecção (h)

Neste seminário, abordaremos apenas o segundo, tendo em vista o estudo da transferência de calor.

Coeficiente Convectivo local

Podemos demonstrar a relação entre as condições presentes na camada limite térmica e o seu coeficiente de transferência de calor por convecção a partir das leis:

- Lei de Fourrier
- Lei de Newton do Resfriamento

Coeficiente Convectivo local

A uma distância x qualquer da aresta frontal da superfície, podemos obter o fluxo **local** aplicando a lei de Fourrier no fluido, em y = 0

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

Coeficiente Convectivo local

Uma vez que estamos tratando do fluxo térmico na superfície sólida, podemos nos atentar novamente à condição de não deslizamento. Dessa forma, sabendo que não há movimentação do fluído, conclui-se que também que a única forma de transferência de energia é a condução.

Portanto, da lei de resfriamento de Newton, obtemos:

$$q_s'' = h(T_s - T_\infty)$$

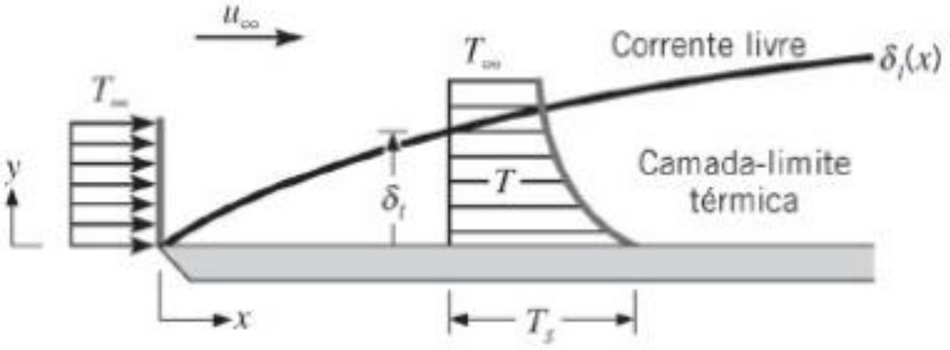
Coeficiente Convectivo local

Combinando as duas equações que encontramos anteriormente para o fluxo de energia na superfície, chegamos a seguinte expressão:

$$h = \frac{-k_f \, \partial T / \partial y \big|_{y=0}}{T_s - T_\infty}$$

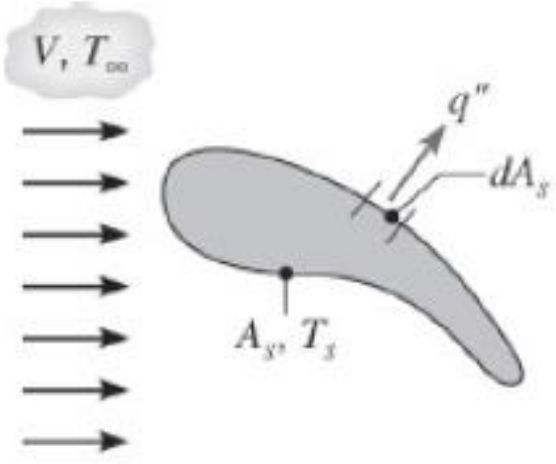
Coeficiente Convectivo local

Assim, as condições no interior da camada-limite térmica, que influenciam fortemente o gradiente de temperatura na superfície $\partial T / \partial y|_{y=0}$, determinam a taxa de transferência de calor através da camada-limite. Como $(T_s - T_\infty)$ é uma constante, independente de x, enquanto δ_t cresce com o aumento de x, os gradientes de temperatura na camada-limite devem diminuir com o aumento de x. Deste modo, a magnitude de $\partial T / \partial y|_{y=0}$ diminui com o aumento de x e tem-se que e h diminuem com o aumento de x.



Coeficiente Convectivo Médio

Em uma superfície arbitrária, ocorrerá transferência de calor por convecção se a temperatura do fluido for diferente daquela da superfície.



Coeficiente Convectivo Médio

Para obter a taxa total de transferência de calor (*q*) devemos integrar o fluxo local por toda a superfície, já que o coeficiente convectivo local (*h*) varia ao longo dela.

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

Também é possível calcular a taxa total de transferência de calor (*q*) se considerarmos um coeficiente convectivo médio (*h barrado*) para toda a superfície.

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

Coeficiente Convectivo Médio

Igualando as duas equações obtemos uma forma de calcular o coeficiente convectivo médio, relacionando-o com o coeficiente local:

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

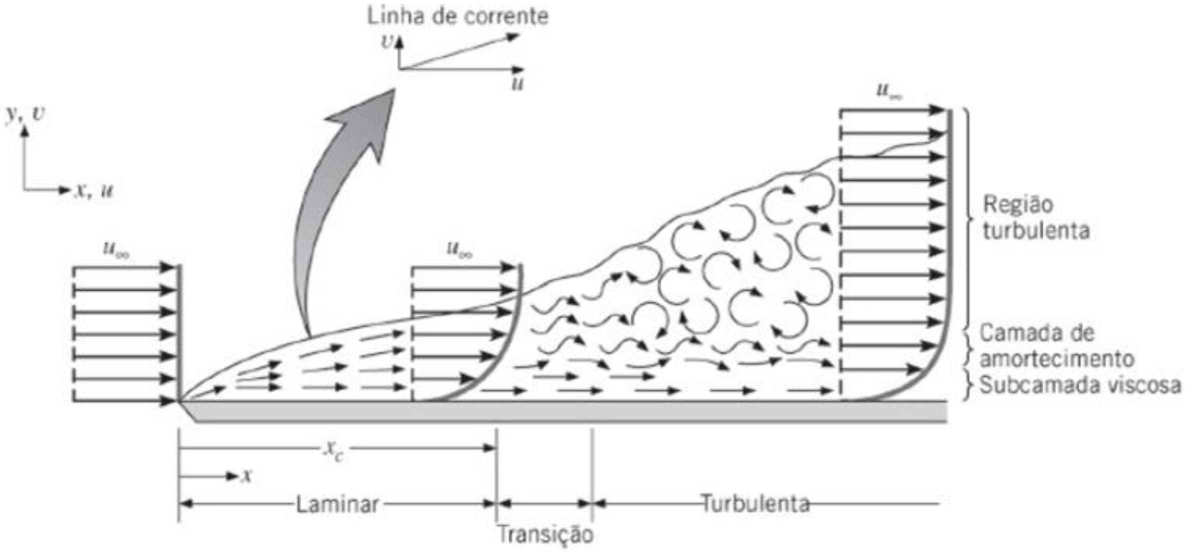
A determinação dos coeficientes convectivos local e médio são muito importantes para a obtenção de dados como a taxa total de transferência de calor e o fluxo local.

Essa tarefa não é fácil, pois dependem de muitas propriedades, tanto do fluido quanto da geometria da superfície e até condições de escoamento.

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

$$h = \frac{-k_f\,\partial T/\partial y\big|_{y=0}}{T_s - T_\infty}$$

Escoamentos Laminar e Turbulento



$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

Numero de Reynolds para uma placa plana.

Escoamentos Laminar e Turbulento

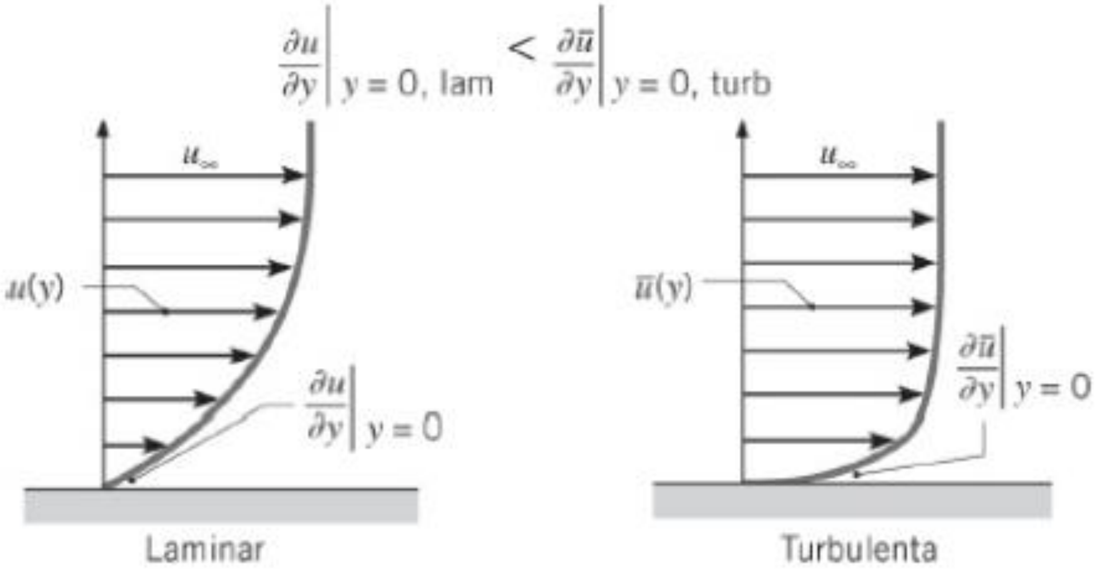
Escoamento **laminar:**

- Movimento ordenado.
- Espessura da camada-limite de velocidade aumenta no sentido do escoamento.
- Gradientes de velocidade em y=0 diminuem no sentido do escoamento.

Escoamento **turbulento:**

- Movimento irregular.
- Perfil de velocidades quase plano na região turbulenta.
- Grandes gradientes de velocidade próximos à superfície.

Escoamentos Laminar e Turbulento



Camada-Limite Térmica Laminar e Turbulenta

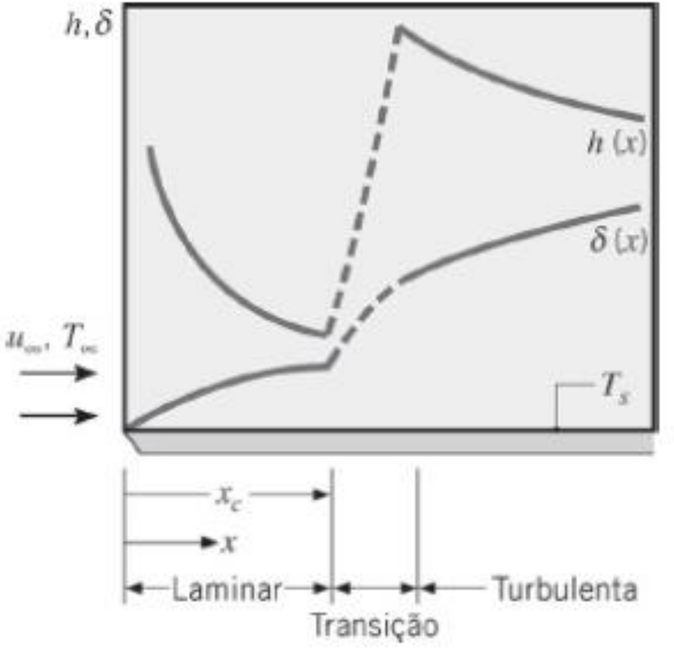
Escoamento **laminar.**

- Espessura da camada-limite térmica aumenta no sentido do escoamento.
- Gradientes de temperatura em y=0 diminuem no sentido do escoamento.
- O coeficiente de transferência de calor diminui no sentido do escoamento.

Escoamento **turbulento:**

- Grandes gradientes de temperatura próximos à superfície.
- O coeficiente de transferência de calor aumenta durante a transição.

Camada-Limite Térmica Laminar e Turbulenta



$$Re_{x,c} \equiv \frac{\rho u_\infty x_c}{\mu} = 5 \times 10^5$$

Parâmetros de Similaridade Adimensionais

É possível equacionar as camadas-limite de velocidade e térmica a partir das leis da natureza.

$$u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho}\frac{dp_\infty}{dx} + \nu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$u\frac{\partial T}{\partial x} + v\frac{\partial T}{\partial y} = \alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\nu}{c_p}\left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2$$

Que por sua vez podem ser adaptadas com variáveis independentes adimensionais.

$$u^*\frac{\partial u^*}{\partial x^*} + v^*\frac{\partial u^*}{\partial y^*} = -\frac{dp^*}{dx^*} + \frac{1}{Re_L}\frac{\partial^2 u^*}{\partial y^{*2}}$$

$$u^*\frac{\partial T^*}{\partial x^*} + v^*\frac{\partial T^*}{\partial y^*} = \frac{1}{Re_L\,Pr}\frac{\partial^2 T^*}{\partial y^{*2}}$$

Número de Nusselt

Utilizando a definição do coeficiente convectivo local e unindo às equações com variáveis adimensionais, obtemos o Número de Nusselt

$$Nu \equiv \frac{hL}{k_f} = + \left.\frac{\partial T^*}{\partial y^*}\right|_{y^*=0}$$

Número de Nusselt

Considerando que a temperatura adimensional é:

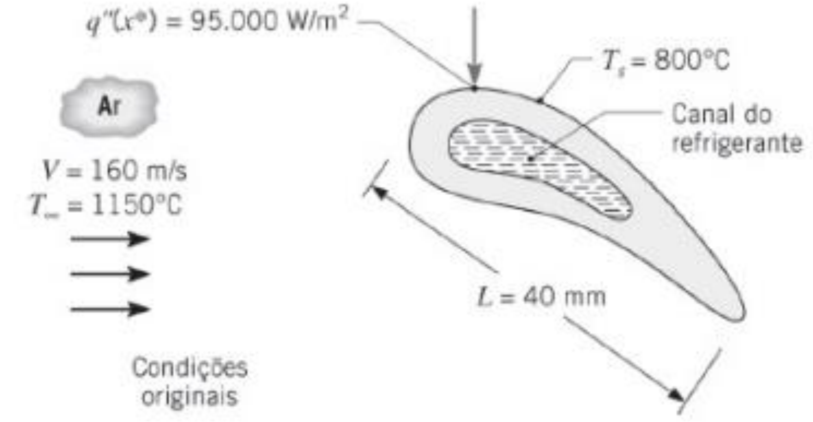
$$T^* = f\left(x^*, y^*, Re_L, Pr, \frac{dp^*}{dx^*}\right)$$

Vemos que:

$$Nu = f(x^*, Re_L, Pr)$$

Questão

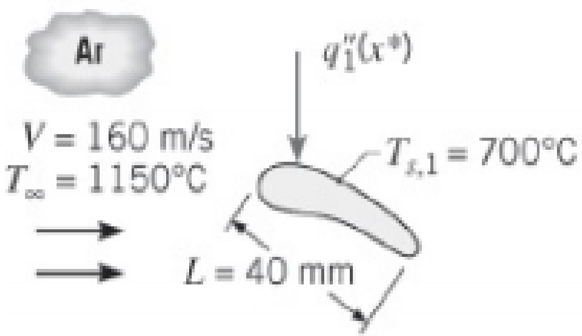
O fluxo térmico para uma pá em um ponto particular (x*) sobre a superfície foi medido, sendo q″ = 95.000 W/m2 . Para manter uma temperatura superficial em regime estacionário de 800°C, o calor transferido para a pá é removido por uma substância refrigerante que circula pelo seu interior. Determine o fluxo térmico para a pá em x* se a sua temperatura superficial for reduzida para Ts,1 = 700°C através do aumento da vazão do refri



Solução

Considerações:

1. Escoamento incompressível e em regime estacionário.
2. Propriedades do ar constantes.



Solução

Temos que

$$q'' = h(T_\infty - T_s)$$

Dessa forma:

$$h = \frac{q''}{(T_\infty - T_s)}$$

Sabemos que o número de Nusselt permanece constante $Nu = \frac{hL}{k} = f(x^*, Re_L, Pr)$

Solução

Não há mudanças nos valores de x*, Re e Pr, pois as propriedades físicas são constantes. Além disso o coeficiente convectivo permanece o mesmo pois L e k não mudam. Assim, podemos fazer:

$$q_1'' = h(T_\infty - T_{s,1}) = \frac{q''}{(T_\infty - T_s)}(T_\infty - T_{s,1})$$

$$= \frac{95.000 \text{ W/m}^2}{(1150 - 800)°\text{C}}(1150 - 700)°\text{C}$$

$$= 122.000 \text{ W/m}^2$$

Significado físico dos números adimensionais

Todos os parâmetros adimensionais anteriores possuem interpretações físicas relacionadas às condições no escoamento, não somente para camadas-limite mas também para outros tipos de escoamento, tais como os escoamentos internos.

- **Número de Reynolds, Re**

  O número de Reynolds pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e as força

$$\frac{F_I}{F_c} \approx \frac{\rho V^2/L}{\mu V/L^2} = \frac{\rho VL}{\mu} = Re_L$$

Significado físico dos números adimensionais

- **Número de Prandtl**

  O número de Prandltl é definido como a razão entre a viscosidade cinemática, e a difusividade térmica α. Ele pode ser interpretado como a medida da efetividade relativa dos transportes, por difusão, de momento e de energia no interior das camadas limites de velocidade e térmica.

  Onde δ é espessura da camada-limite.

$$\frac{\delta}{\delta_t} \approx Pr^n$$

Significado físico dos números adimensionais

- **Número de Schimidt**

  O número de Schimidt mede a efetividade relativa dos transportes difusivos de momento e de massa nas camadas-limite de velocidade e de concentração. Para a transferência de massa por convecção em escoamentos laminares, ele, consequentemente, determina as espessuras relativas das camadas-limite de velocidade e de concentração.

$$\frac{\delta}{\delta_c} \approx Sc^n$$

Significado físico dos números adimensionais

- **Número de Lewis**

  O número de Lewis é uma medida das espessuras relativas das camadas-limite térmica e de concentração.

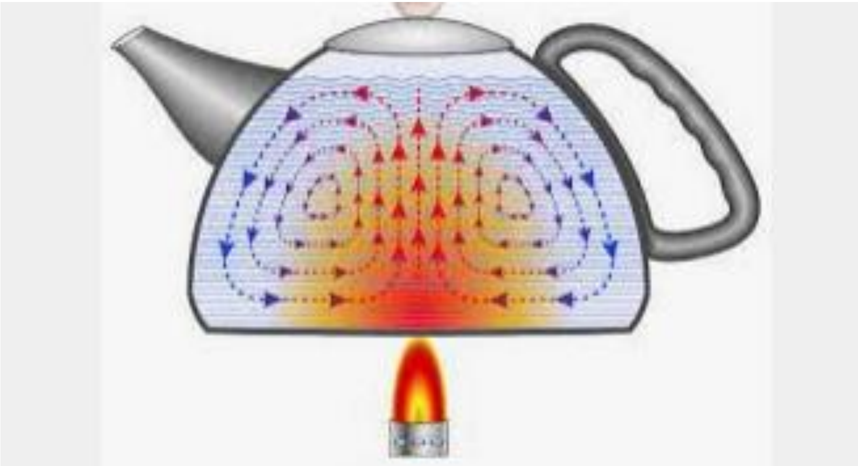
$$\frac{\delta_t}{\delta_c} \approx Le^n$$

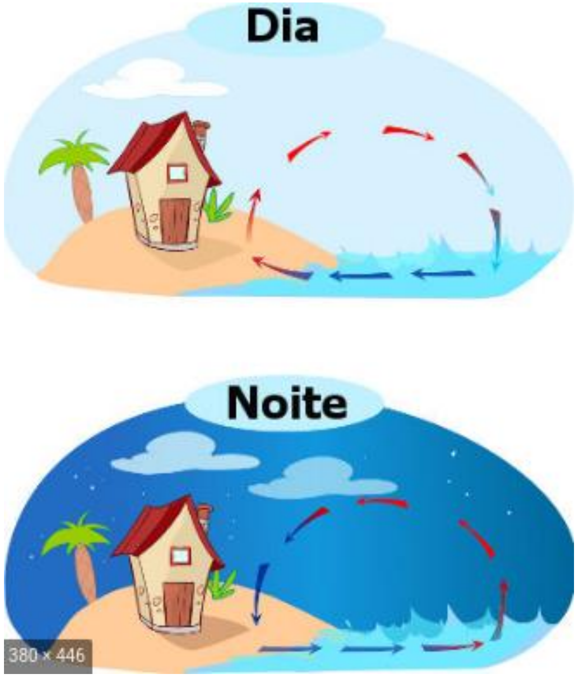
  Além disso, também pode ser determinado como

$$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr}$$

Aplicações da convecção

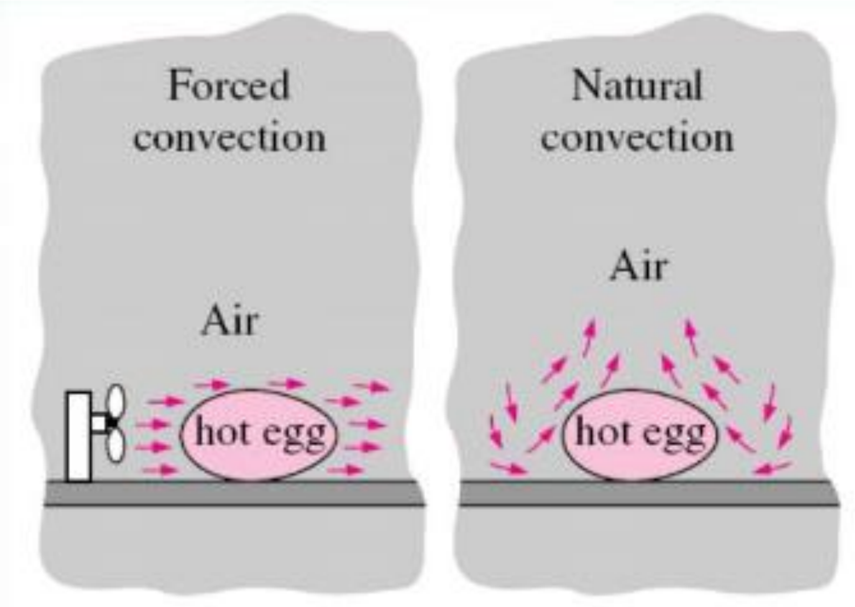
- **Convecção natural**





Aplicações da convecção

- **Convecção forçada**



Referências

- **Bergman, Theodore, et al.** *Fundamento de Transferência de Calor e de Massa.* **7° Ed. Rio de Janeiro, 2014.**