Convecção

Prof. Simões

Objetivos dessa aula

- Definir convecção
- Entender o que é a película de convecção e seu coeficiente de transmissão de calor
- Entender os valores adimensionais que definem o coeficiente de transmissão de calor da película
- Identificar vários casos de convecção, e que fórmulas empíricas aplicar em cada caso
- Reunir as informações para calcular o fluxo de calor por conveção em várias situações

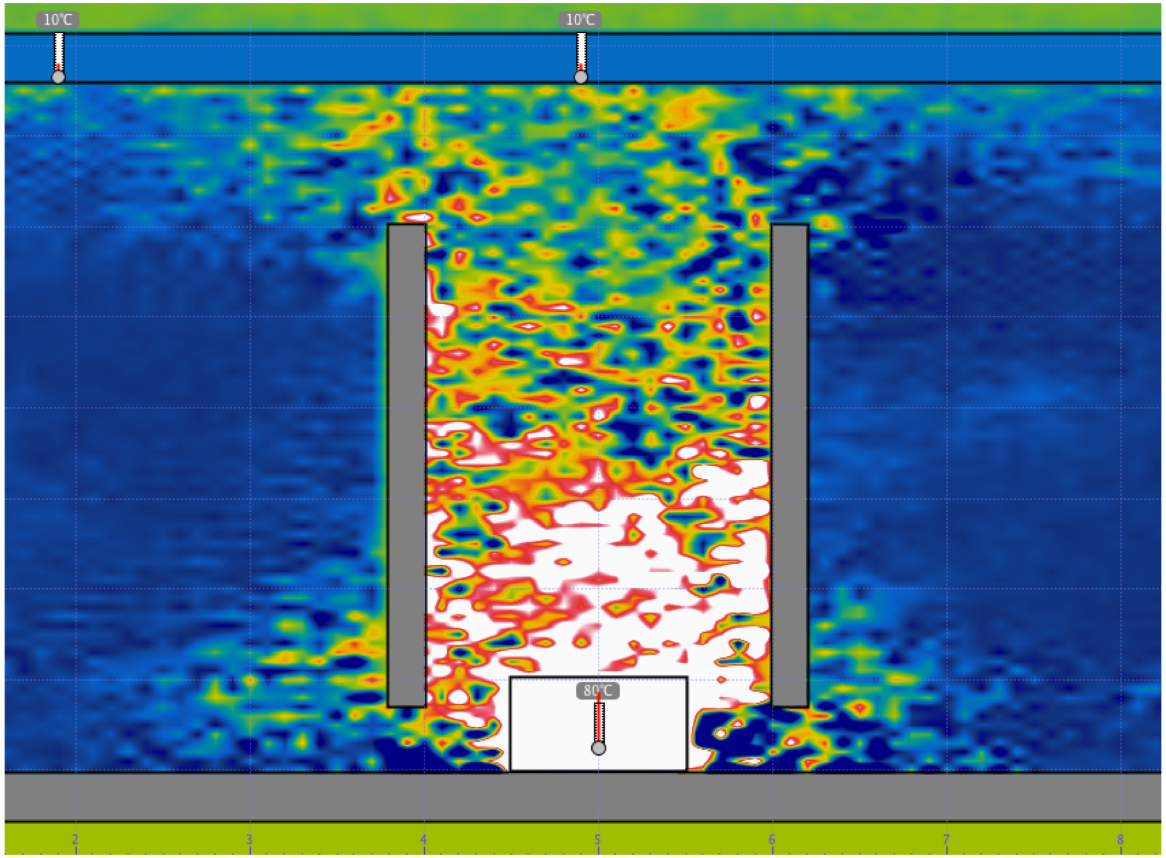
Problema típico

Um reservatório de formato cilíndrico montado verticalmente, com diâmetro externo de 1,5 m e altura de 2,0 m apresenta uma temperatura superficial de 40°C na lateral e face superior. Considerando um ambiente a 25°C, calcule a transferência de calor por convecção natural total (lateral mais tampo).

Resposta: $8{,}1 \times 10^2$ W

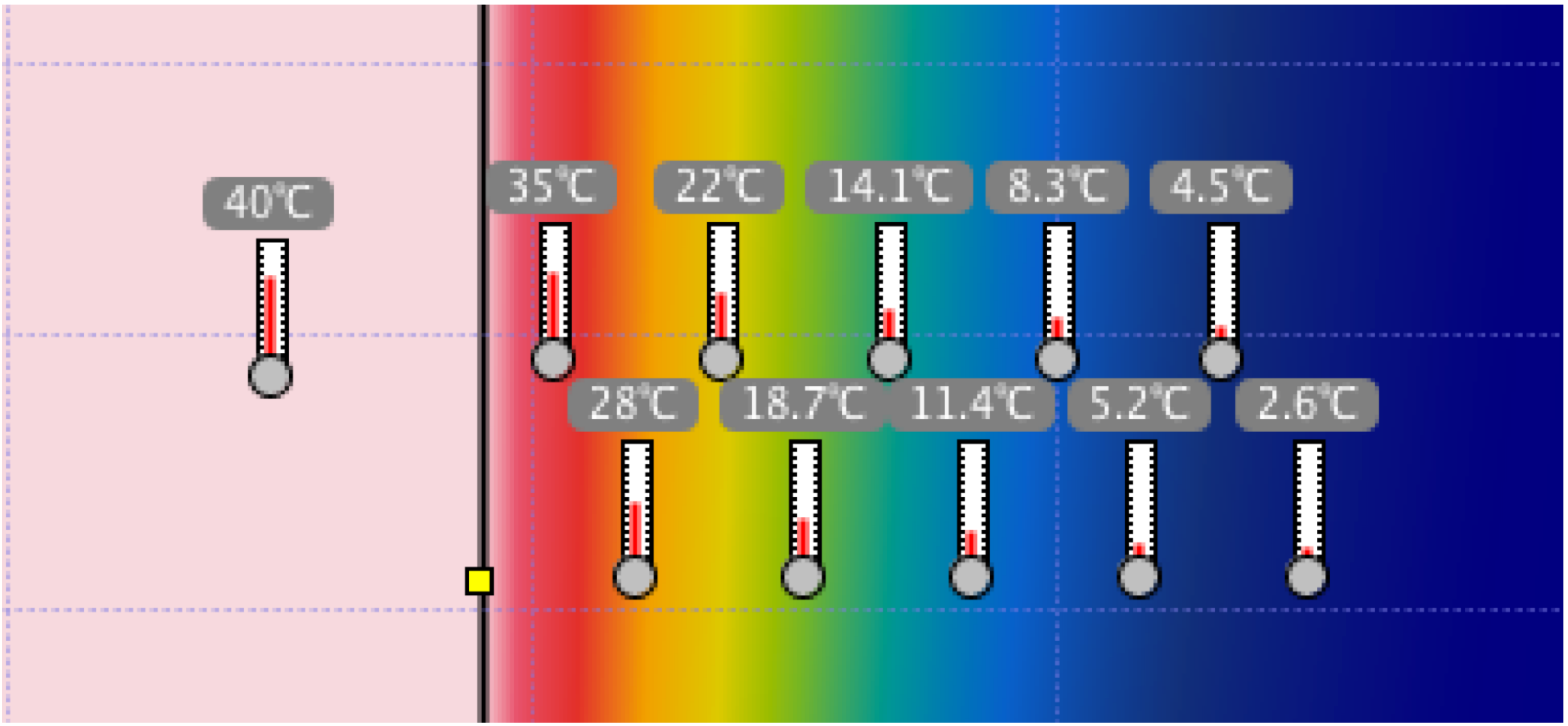
Definição

- Ocorre em materiais líquidos e gasosos – há deslocamento de massa
- Com o aumento da agitação das partículas, há um maior afastamento entre elas, com a consequente diminuição da densidade
- As regiões mais quentes (menos densas) movem-se para cima, e as mais frias (mais densas), para baixo



Película de convecção

- Próximo à superfície, forma-se uma película na qual o calor é transferido
- A taxa de transferência de calor nessa película é o coeficiente de transferência de calor, h, ou <u>coeficiente de película</u>



Fluxo de calor por convecção

- O fluxo de calor será dado pela fórmula de Newton:

$$\dot{q} = h \cdot A \cdot \Delta T$$

Onde

$\dot{q} \Rightarrow fluxo\ de\ calor[W]$

$h \Rightarrow coeficiente\ de\ película\ \left[\frac{W}{m^2K} = \frac{W}{m^2{}^{\circ}C}\right]$

$A \Rightarrow área\ de\ transferência\ [m^2]$

$\Delta T \Rightarrow T_{superfície} - T_{ambiente}\ [^{\circ}C\ ou\ K]$

- O coeficiente h representa o fluxo de calor por unidade de área por grau de temperatura que passa pela película de conveção

Unidades do coeficiente de película h

- O coeficiente h pode ser expresso também em:

$$1{,}0\,\frac{BTU}{h\cdot ft^2\cdot {}^\circ F}=5{,}679\,\frac{W}{m^2\cdot K}$$

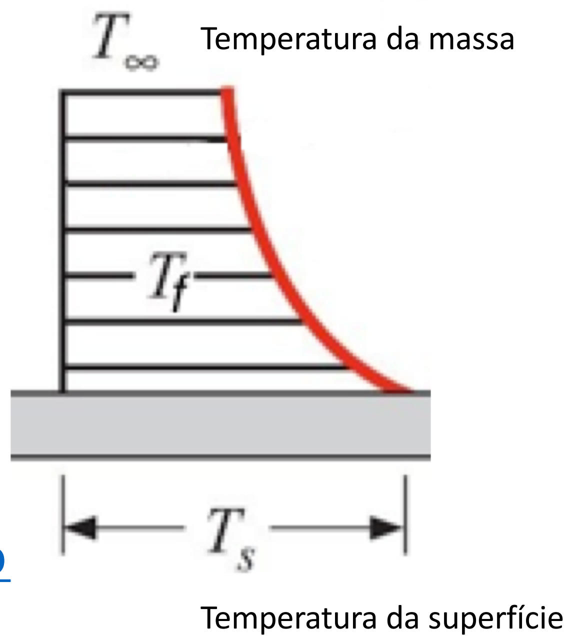
$$1{,}0\,\frac{kcal}{h\cdot m^2\cdot K}=1{,}163\,\frac{W}{m^2\cdot K}$$

- O cálculo do coeficiente de película h depende dos seguintes valores empíricos adimencionais:
  - Re: número de Reynolds
  - Pr : número de Prandtl
  - Nu: número de Nusselt
  - Gr: número de Grashof
- O cálculo desses fatores, por sua vez, exige a compreensão de alguns conceitos, que serão discutidos a seguir

Valores necessários para o cálculo de $\boldsymbol{h}$

- Vários dos valores dependem da temperadura do fluido da película.
- A temperatura a ser usada é a temperatura média da película T_f:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2}$$



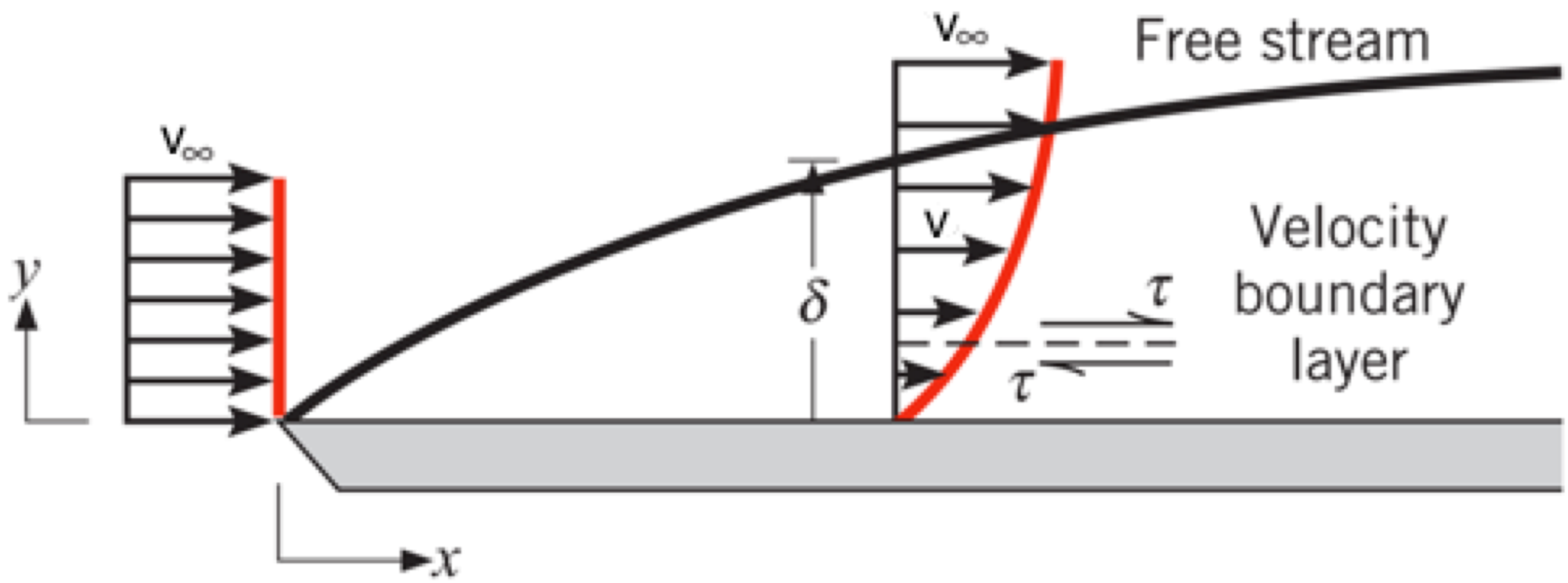
- Há sites e tabelas apropriadas, como:
  - Ar: https://www.engineeringtoolbox.com/air-prod_156.html
  - Água: https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html

Valores necessários para o cálculo de h

- Alguns valores necessários serão:
  - $L \Rightarrow$ dimensão característica $[m]$, depende de cada caso (diâmetro, comprimento, etc)
  - $\mu \Rightarrow$ viscosidade dinâmica $[Pa \cdot s]$
  - $\nu \Rightarrow$ viscosidade cinemática, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$
  - $\rho \Rightarrow$ densidade do fluido $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
  - $c_p \Rightarrow$ calor específico do fluido (pressão constante) $\left[\frac{J}{kgK}\right]$
  - $k \Rightarrow$ condutividade térmica do fluido $\left[\frac{W}{mK}\right]$
  - $\delta \Rightarrow$ coeficiente de expanção volumétrica do fluido $\left[\frac{1}{K}\right]$
  - $v \Rightarrow$ velocidade do fluido $\left[\frac{m}{s}\right]$

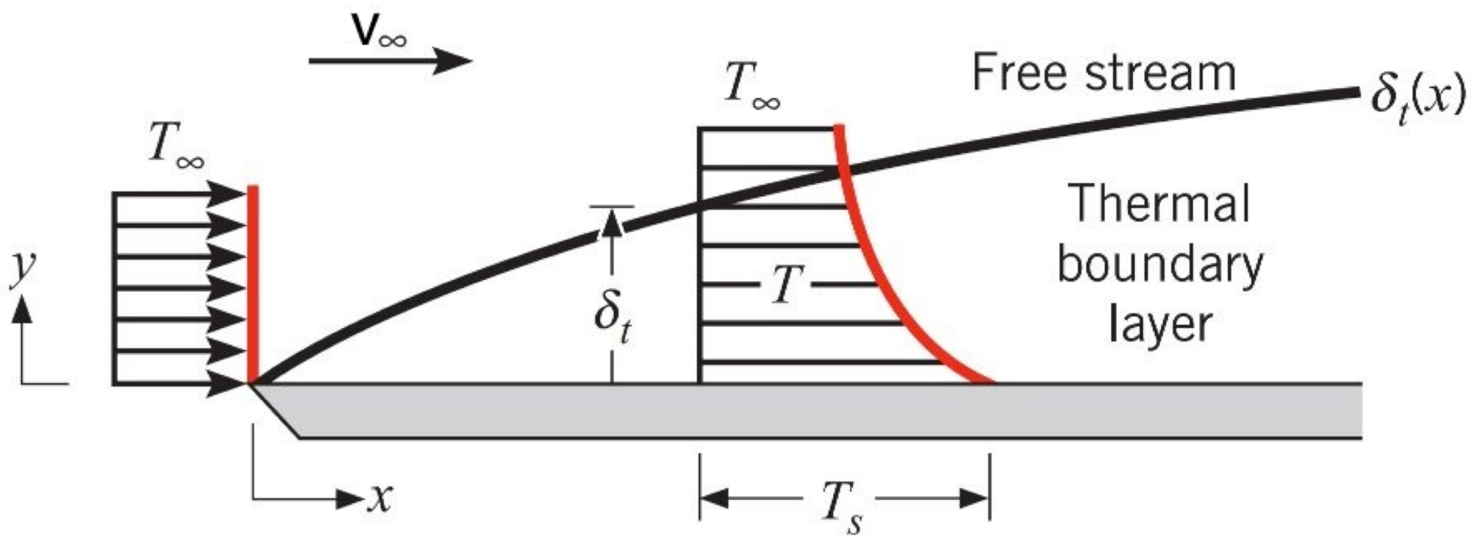
Película de convecção – espessura hidrodinâmica

- Como um dos elementos é fluido, haverá uma distribuição da velocidade relativa entre a superfície e as camadas do fuido
- A camada próxima à superfície sólida terá velocidade quase nula
- A película hidrodinâmica tem espessura δ, na qual $v = 0{,}99 \cdot v_\infty$, sendo v_∞ a velocidade do fluido longe da superfície.



Película de convecção – espessura termodinâmica

- Como há movimentação de massa, haverá uma distribuição da temperatura relativa entre a superfície e as camadas do fluido
- A temperatura da camada próxima à superfície é igual à da superfície
- A película térmica tem espessura δ_t, na qual $T = T_s + 0{,}99(T_\infty - T_s)$, sendo T_∞ a temperatura do fluido longe da superfície



- Próximo à superfície, a transferência se dá por condução, e, a uma distância maior, por convecção propriamente.

Número de Prandtl – relação entre espessuras

- A relação entre a espessura dos limites de velocidade e da temperatura (hidrodinâmica e termodinâmica) na película de convecção é dada por um valor adimencional chamado número de Prandt, ou seja, o quanto a camada hidrodinâmica é mais espessa que a térmica:

$$Pr = \frac{difus\tilde{a}o\ da\ velocidade}{difus\tilde{a}o\ do\ calor} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{k}{\rho \cdot c_p}} \frac{c_p \cdot \mu}{k}$$

Onde:

$c_p \Rightarrow$ calor específico do fluido (pressão constante) $\left[\frac{J}{kgK}\right]$

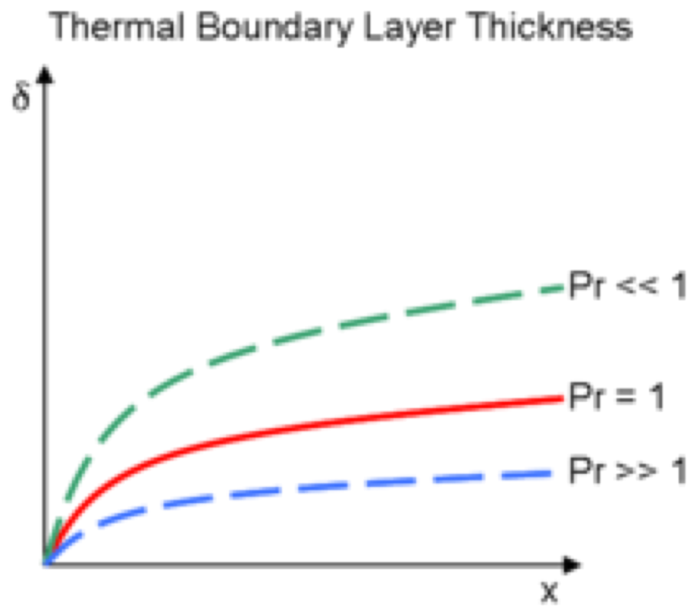
$\mu \Rightarrow$ viscosidade dinâmica $[Pa \cdot s]$

$k \Rightarrow$ condutividade térmica do fluido $\left[\frac{W}{mK}\right]$

Número de Prandtl – relação entre espessuras

- Nos gases é aproximadamente 1, indicando que a velocidade (momento) e a temperatura se equilibram ao mesmo tempo (quando menor que 1, o fluido já terá atingido a velocidade, mas não a temperatura).
- Para água e óleo, a camada de dispersão de velocidade é maior que a de dispersão de calor (bem maior em alguns casos, ou seja, o óleo não terá atingido a velocidade plena, mas sua temperatura já será igual à da superfície)

Fluid	**Pr**
Liquid metals	0.004 – 0.030
Gases	0.7 – 1.0
Water	1.7 – 13.7
Light organic fluids	5 – 50
Oils	50 – 100,000
Glycerin	2000 – 100,000



http://www.mhtl.uwaterloo.ca/courses_old/ece309/notes/convection/prandtl.pdf

Número de Nusselt – relação entre convecção e condução

- A relação entre a quantidade de calor transmitida por convecção e por condução é dada pelo Número de Nusselt:

$$Nu = \frac{Trasf.por\ convecção}{Transf.por\ condução} = \frac{h}{\frac{k}{L}} = \frac{h \cdot L}{k}$$

Onde:

$h \Rightarrow$ coeficiente de película $\left[\frac{W}{m^2 K} = \frac{W}{m^2 °C}\right]$

$k \Rightarrow$ coeficiente de condutividade $\left[\frac{W}{mK}\right]$

$L \Rightarrow$ dimensão característica (ex. diâmetro, comprimento, etc) $[m]$

- Quanto maior o valor de Nu, maior a taxa de transferência de calor por convecção

Número de Nusselt

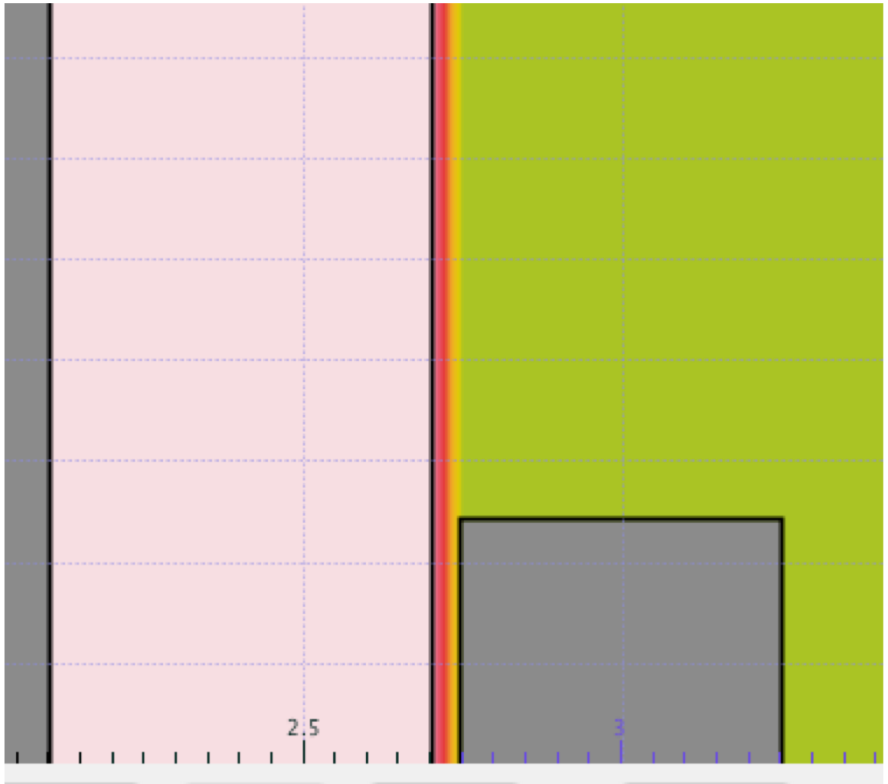
- O número de Nusselt é calculado usando os demais valores adimencionais ($\Pr, Gr$ e Re), por meio de fórmulas que veremos adiante.

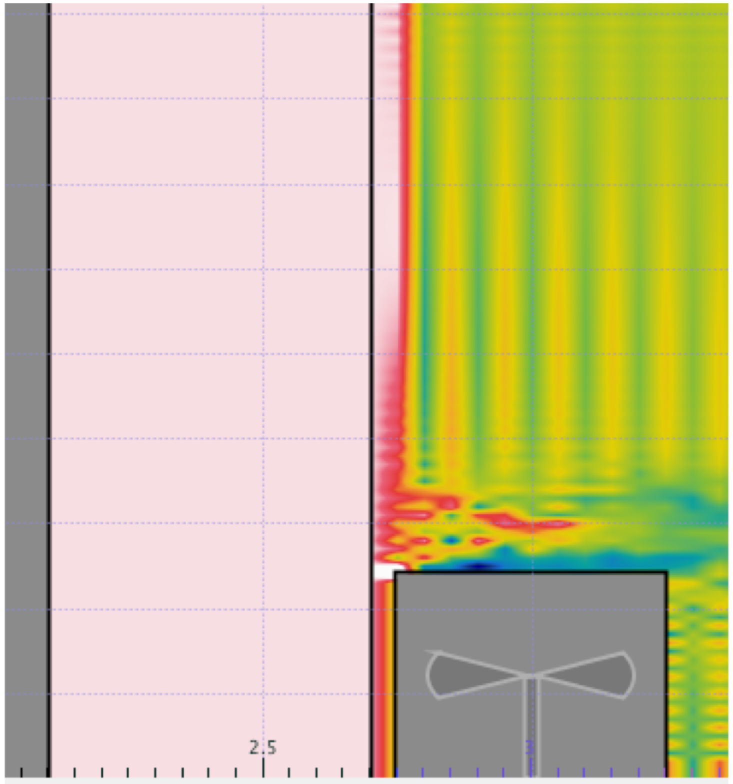
- A partir daí, determinamos o valor de h, fazendo:

$$Nu = \frac{h \cdot L}{k} \Rightarrow h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

Convecção natural e forçada

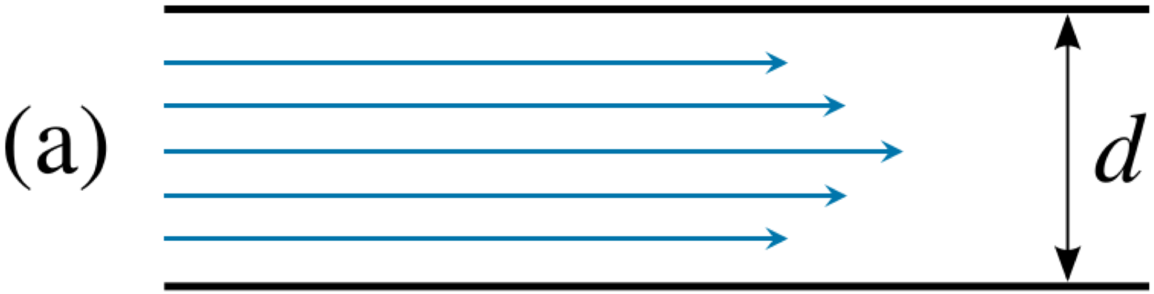
- **Convecção natural**: a movimentação da massa é causada exclusivamente pelas diferenças de temperatura
- **Convecção forçada**: aplica-se uma fonte de energia mecânica externa para promover a movimentação, como um ventilador, exaustor, insuflador, etc.
- O deslocamento do fluido pode se dar em regime **laminar** ou **turbulento**



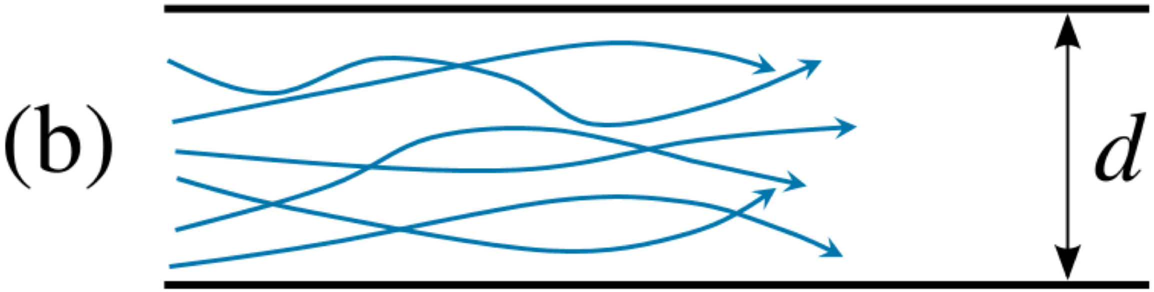


Fluxo laminar e turbulento

- Osborne Reynolds (1842-1912) demonstrou que o regime de deslocamento de um fluido pode se dar de duas formas, separadas por um regime de transição:

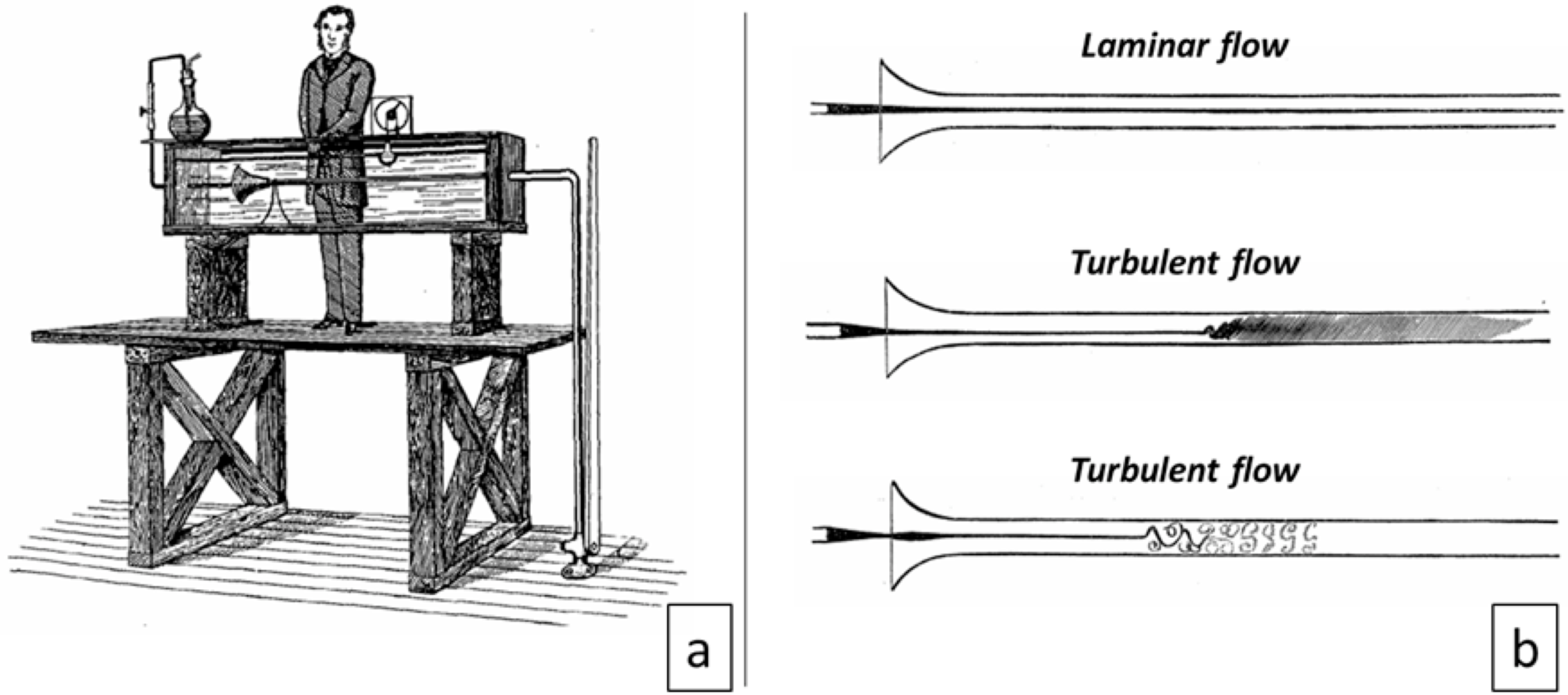


Laminar: o deslocamento das partículas é longitudinal ao movimento e não há mistura de camadas

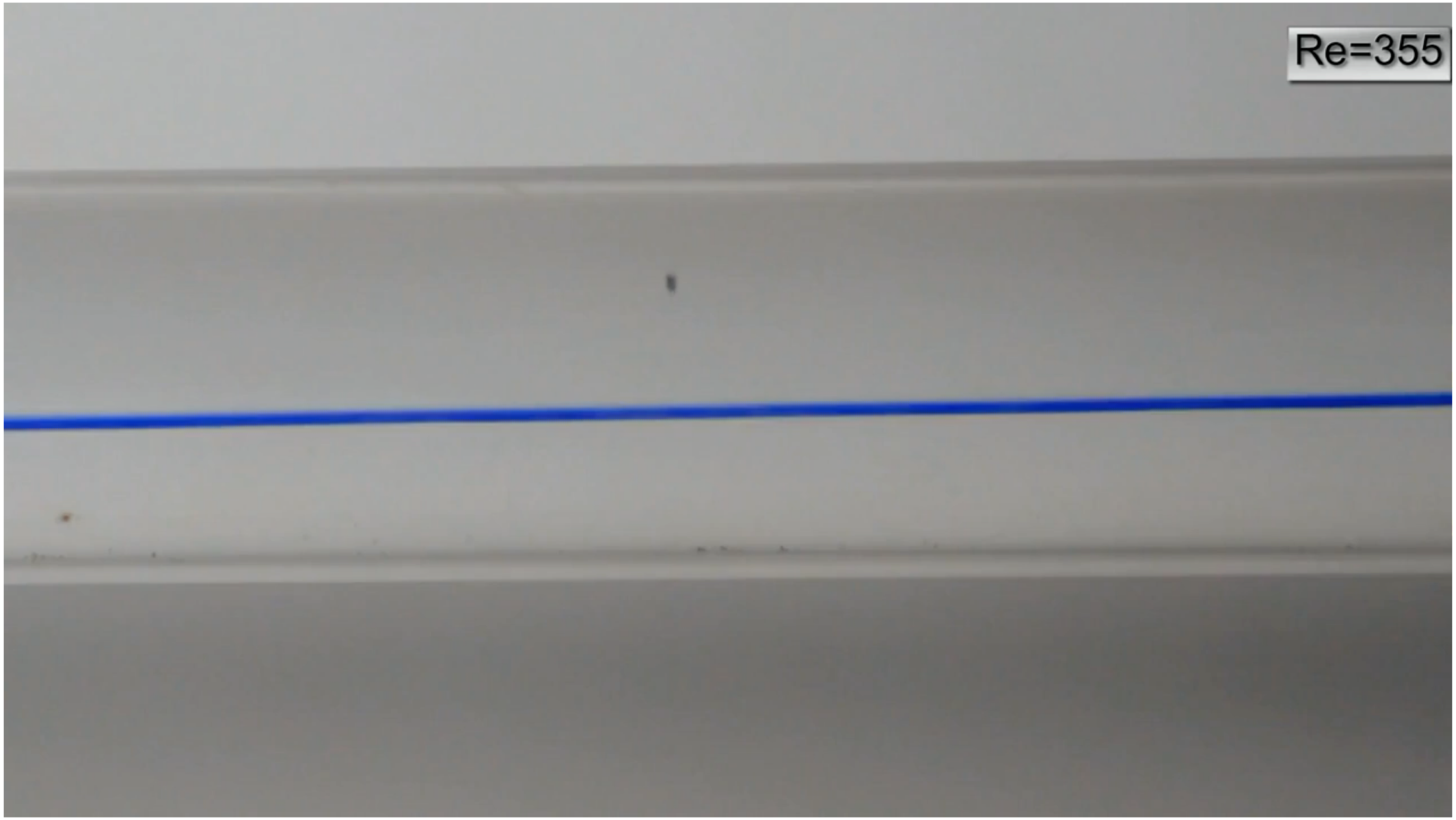


Turbulento: as camadas se misturam e há movimentos transversais, com formação de torvelinhos

Experimento de Reynolds



Experimento de Reynolds



Fluxo laminar e turbulento

- Micrografia de fluxo laminar e turbulento

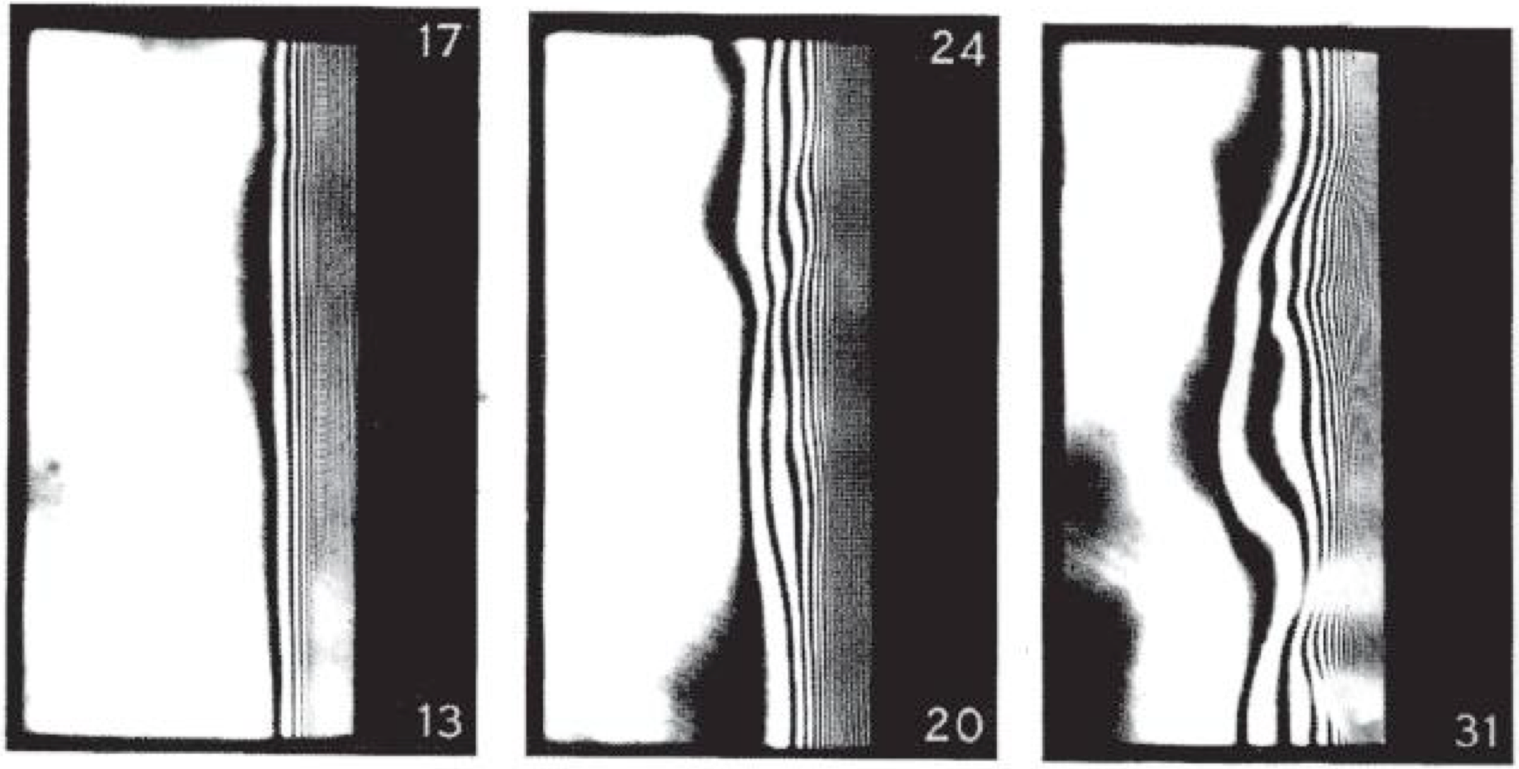


FIGURA 5.6 Fotografia de interferência ilustrando o escoamento por convecção natural laminar e turbulento do ar ao longo de uma placa plana vertical. Os números da fotografia indicam a altura da borda inferior em polegadas. Uma polegada equivale a 2,54 cm.

Fonte: Cortesia do Professor E. R. C. Eckert.

Fluxo laminar e turbulento

- Conforme demonstrado por Reynolds, o regime de deslocamento do fluido depende do deslocamento do fluido (forças inerciais) e da viscosidade (atrito interno).
- Ele estabeleceu a seguinte relação adimensional:

$$Re = \frac{Movimento}{Viscosidade} = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

Onde:

$R_e \Rightarrow número\ de\ Reynolds$

$\rho \Rightarrow densidade\ \left[\frac{kg}{m^3}\right]$

$v \Rightarrow velocidade\ \left[\frac{m}{s}\right]$

$L \Rightarrow dimensão\ característica$

$(diâmetro, comprimento, etc)\ [m]$

$\mu \Rightarrow viscosidade\ dinâmica\ \left[Pa \cdot s = \frac{Ns}{m^2}\right]$

Princípio: Quando o atrito interno (viscosidade) prevalece, o fluxo é laminar (números mais baixos); quando as forças inerciais prevalecem, o fluxo é turbulento (números altos)

Valores Re de referência

Configuração	Regime Laminar	Transição	Regime Turbulento
Fluxo paralelo a uma placa	$Re \leq 5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$	$Re > 10^7$
Fluxo perpendicular a um cilindro	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$Re \cong 2 \cdot 10^5$	$Re > 2 \cdot 10^5$
Fluxo ao redor de uma esfera	$Re \leq 2 \cdot 10^5$	$Re \cong 2 \cdot 10^5$	$Re > 2 \cdot 10^5$
Fluxo em um tubo	$Re \leq 2300$	$2300 < Re < 4000$	$Re > 4000$

Fonte: https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/what-is-laminar-flow.html

Número de Grashof

- Representa a razão entre a força de empuxo, devido à variação espacial na densidade do fluido (causada por diferenças de temperatura), e a força de restrição devido à viscosidade do fluido.

$$Gr = \frac{Empuxo}{Viscosidade} = \frac{L^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

Onde:

$L \Rightarrow dimensão\ característica\ (diâmetro, comprimento, etc)[m]$

$\beta \Rightarrow$ coeficiente de expançã$o\ térmica \left[\frac{1}{K}\right]$

$\nu \Rightarrow$ viscosidade cinemática, $\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{m^2}{s}\right]$

$\Delta T \Rightarrow$ diferença de temperatura, $[°C\ ou\ K]$

$g \Rightarrow$ aceleração normal da gravidade , $g = 9{,}81\ m/s^2$

Para o ar, $\beta = \frac{1}{T_f}, onde\ T_f \Rightarrow Temp.média\ da\ película$ em K

Número de Grashof

- O número de Grashof é, para a convecção natural, similar ao número de Reynolds, para a convecção forçada.
- Assim:
  - Quando $\frac{Gr}{Re^2} \cong 1$, os efeitos combinados de convecção natural e forçada têm que ser tomados em conta, pois são similares
  - Quando $\frac{Gr}{Re^2} >> 1$, os efeitos de convecção natural são predominantes
  - Quando $\frac{Gr}{Re^2} << 1$, os efeitos de convecção forçada são predominantes

Procedimento para o cálculo de h

1. Identificamos o caso de transferência de calor por convecção e a respectiva fórmula de Nu
2. Calculamos o valor de Nu, sendo:

$Nu = f(Re, \mathrm{Pr}, Gr)$, onde:

$$Re\ (Número\ de\ Reynolds) \Rightarrow Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

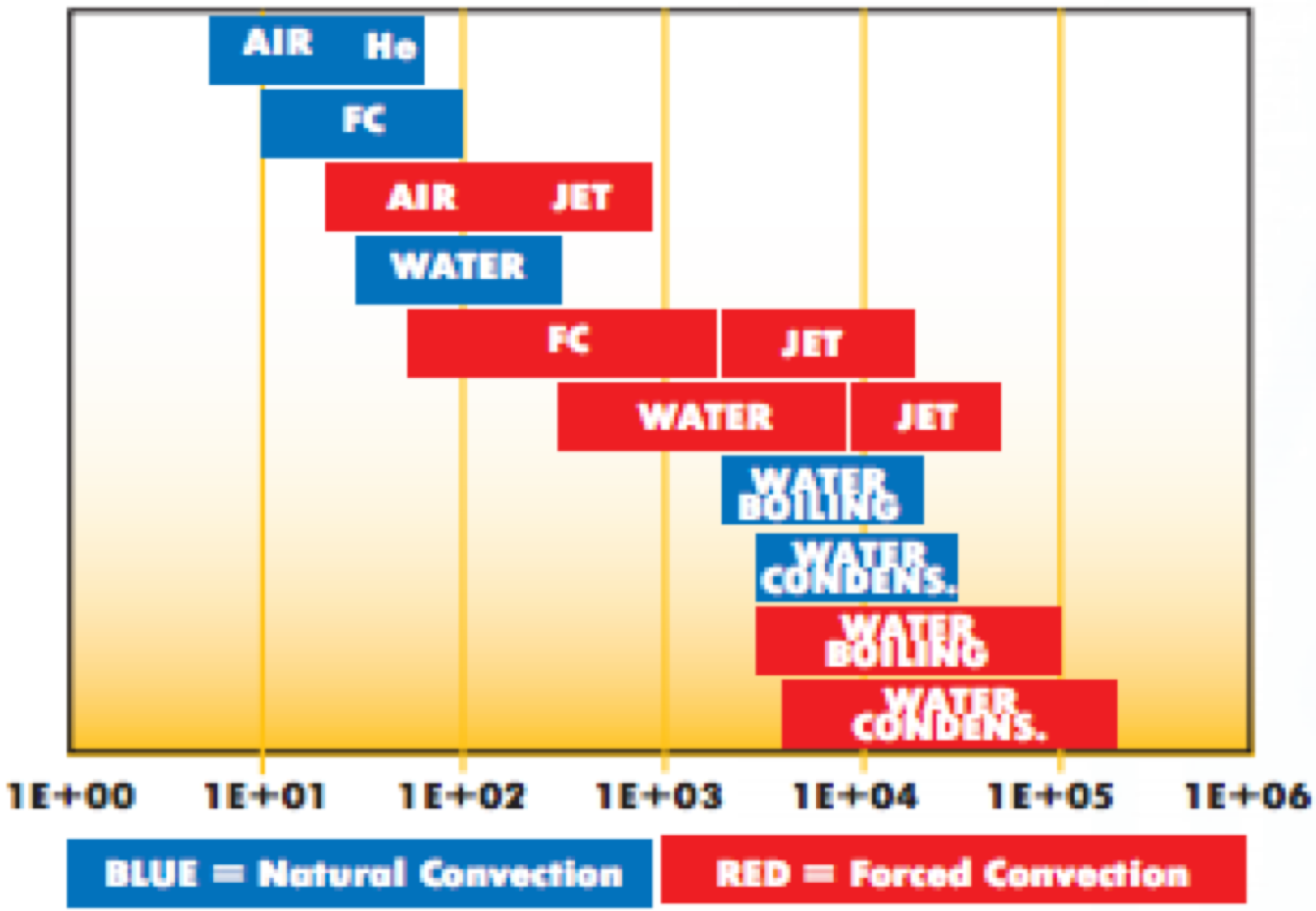
$$\mathrm{Pr}\ (Número\ de\ Prandt) \Rightarrow Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k}$$

$$Gr\ (Número\ de\ Grashof) \Rightarrow Gr = \frac{L^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

3. Calculamos h usando a fórmula de Nusselt, $h = \frac{Nu \cdot k}{L}$
4. Calculamos o fluxo de calor, $\dot{q} = h \cdot A \cdot \Delta T$

Valores aproximados de h

- Como referência, seguem a ordem de grandeza de alguns valores de h:



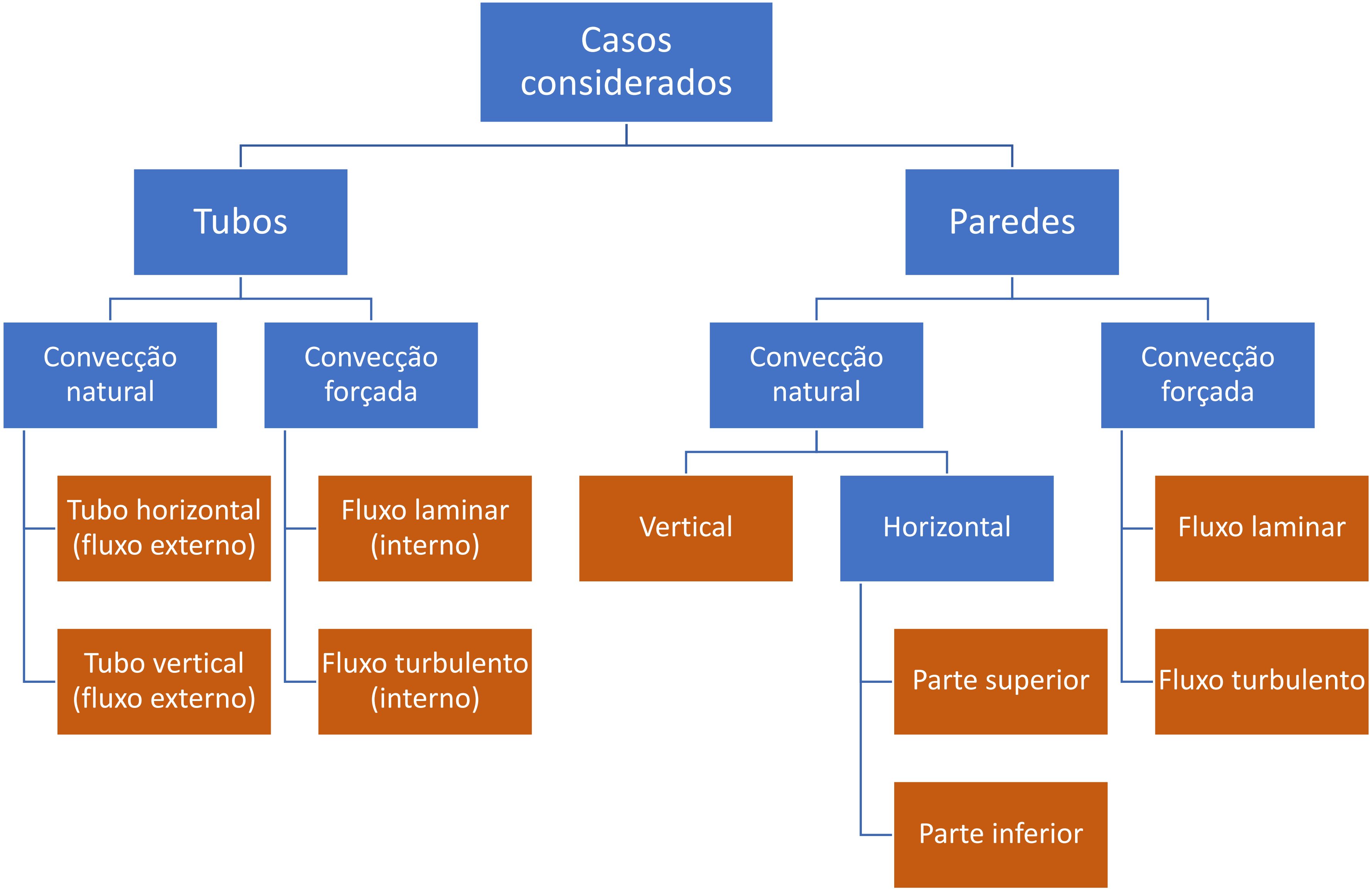
W/m^{2}K

http://www.qats.com/Qpedia-Article/Qpedia_Apr07_Understanding_Heat_Transfer_Coefficient

Observações sobre o cálculo de $Nu = f(Re, \mathrm{Pr}, Gr)$

- Utilizam-se fórmulas empíricas para as situações mais típicas.
- Vale ressaltar que há uma grande variedade de situações, com suas respectivas fórmulas, por vezes com ligeiras diferenças entre os autores.
- É importante utilizar um sistema consistente, e que mais se aproxime da situação do projeto.
- Analisaremos alguns casos mais comuns, que atendem à maior parte dos projetos e ilustram o processo.
- Em um projeto real, se o caso não for contemplado nas análises a seguir, será necessário consultar a literatura especializada.

Casos para o cálculo de Nu



Tubos – convecção natural externa

- Tubo na horizontal:

$$Nu = \left[0{,}60 + \frac{0{,}387 \cdot (Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{6}}}{\left(1 + \left(\frac{0{,}559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{8}{27}}}\right]^2$$

Para $Gr \cdot Pr < 10^{12}$
L é o diâmetro do tubo em Gr
Churchill & Chu

- Tubo na vertical:

$$Nu = \frac{4}{3}\left[\frac{7 \cdot Gr \cdot Pr^2}{5(20 + 21Pr)}\right]^{\frac{1}{4}} + \frac{4(272 + 315Pr)L}{35(64 + 63Pr)D}$$

Onde a dimensão característica L em Gr e Nu é a altura do tubo, e D o diâmetro em Nu
LeFreve & Ede

Obs.: caso $\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{\frac{1}{4}}}$, pode-se usar o cálculo da parede plana, com L=altura do cilindro

Heat Transfer Handbook, Volume 1
Por Adrian Bejan, Allan D. Kraus

Tubos – convecção forçada

- Fluxo laminar

$$Nu = 3{,}66 + \frac{0{,}065 \cdot Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}}{1 + 0{,}04 \cdot \left(Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}\right)^{\frac{2}{3}}}$$

Em Re, a dimensão característica L é o diâmetro D
Em Nu, L=comprimento e D= diâmetro

- Fluxo Turbulento

$$Nu = 0{,}023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{n}$$

$n = 0{,}3$ para fluido esfriando

$n = 0{,}4$ para fluido aquecendo

$Em\ Re, L = diâmetro\ do\ tubo$

Holman

Superfícies planas, convecção natural

- Vertical

$$Nu = 0{,}59\,(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, \qquad para\ 10^4 < Gr \cdot Pr < 10^9$$

$$Nu = 0{,}10\,(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, \qquad para\ 10^9 < Gr \cdot Pr < 10^{13}$$

Obs.:Para cilindros grandes; L= Altura da parede ou cilindro; usar 0,53 e 0,13, em lugar de 0,59 e 0,10

- Horizontal
  - Superior

$$Nu = 0{,}54\,(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, \quad para\ 10^4 < Gr \cdot Pr < 10^6$$

$$Nu = 0{,}15\,(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}, \quad para\ 10^6 < Gr \cdot Pr < 10^{11}$$

  - Inferior

$$Nu = 0{,}27\,(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}, \quad para\ 10^5 < Gr \cdot Pr < 10^{11}$$

Obs.: $L = \frac{A}{P},\ onde\ A = área\ e\ P = perímetro$

Holman

Superfícies planas, convecção forçada

- Laminar

$$Nu = 0{,}664 \cdot Re^{\frac{1}{2}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

válida para $0{,}6 < \mathrm{Pr} < 50$ (ar, água e fluidos leves)

- Turbulento

$$Nu = \left(0{,}037 \cdot Re^{\frac{4}{5}} - 871\right) \cdot Pr^{\frac{1}{3}}$$

Para a dimensão característica L utilizar a largura da placa, paralela ao fluxo de ar.

Holman

Exemplo

Uma placa vertical de 4,0 metros de altura é mantida a 60°C em um ambiente a 10°C. Calcule o fluxo de calor em um comprimento de 10 metros de parede.

Dados do ar a 35°C:

$$T_f = \frac{60 + 10}{2} = 35°C$$

$$\nu = 1{,}65 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\mu = 1{,}88 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$c_p = 1006 \frac{J}{kgK}$$

$$k = 2{,}70 \cdot 10^{-2} \frac{W}{mK}$$

Exemplo

Um tubo horizontal de 2,0 cm de diâmetro externo possui uma temperatura superficial constante de 38°C e é imerso em um tanque de água a 27°C. Calcule a perda de calor para a água por convecção livre por unidade de comprimento.

Dados da água a 32,5°C:

$$T_f = \frac{38+27}{2} = 32{,}5°C$$

$$\beta = 3{,}03 \cdot 10^{-4} K^{-1}$$

$$\nu = 7{,}61 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\mu = 7{,}57 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s$$

$$c_p = 4180 \ \frac{J}{kgK}$$

$$k = 0{,}615 \frac{W}{mK}$$

Exemplo

Um tubo de 5,0 cm de diâmetro interno conduz água a uma vazão de 25 l/min e uma temperatura constante de 60°C. Calcule a perda de calor por convecção em 10 metros de tubulação, considerando que a parede interna da tubulação esteja constante a 40°C.

Dados da água a 50°C:

$$\beta = 4{,}54 \cdot 10^{-4} K^{-1}$$

$$\nu = 5{,}541 \cdot 10^{-7} \frac{m^2}{s}$$

$$\mu = 5{,}474 \cdot 10^{-4} Pa \cdot s$$

$$c_p = 4180 \ \frac{J}{kgK}$$

$$k = 0{,}640 \frac{W}{mK}$$

$$\rho = 988 \frac{kg}{m^3}$$

$$T_f = \frac{60 + 40}{2} = 50°C$$

Exemplo

Ar a 20°C flui sobre uma placa a 35 m/s. A placa tem 75 cm de largura na direção do fluxo e é mantida a 60°C. O comprimento da placa é 1,0 metro. Calcule a transferência de calor por convecção entre a placa e o ar.

Dados do ar a 40°C:

$$T_f = \frac{60 + 20}{2} = 40°C$$

$$\rho = 1{,}127 \frac{kg}{m^3}$$

$$\nu = 1{,}69 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$$

$$\mu = 1{,}90 \cdot 10^{-5} Pa \cdot s$$

$$c_p = 1007 \frac{J}{kgK}$$

$$k = 2{,}735 \cdot 10^{-2} \frac{W}{mK}$$

Links úteis

- Conversão de unidades
  - http://www.endmemo.com/convert/index.php

- Propriedades da água em várias temperaturas
  - https://www.engineeringtoolbox.com/water-thermal-properties-d_162.html

- Viscosidade e outras propridades do ar a várias temperaturas
  - https://www.engineeringtoolbox.com/air-properties-d_156.html