PMT 3532 - Termohidráulica de Sistemas de Geração de Potência I

Professores: José R. Simões Moreira (EPUSP)

Marcelo da Silva Rocha (IPEN)

Pedro Ernesto Umbehaun (IPEN)

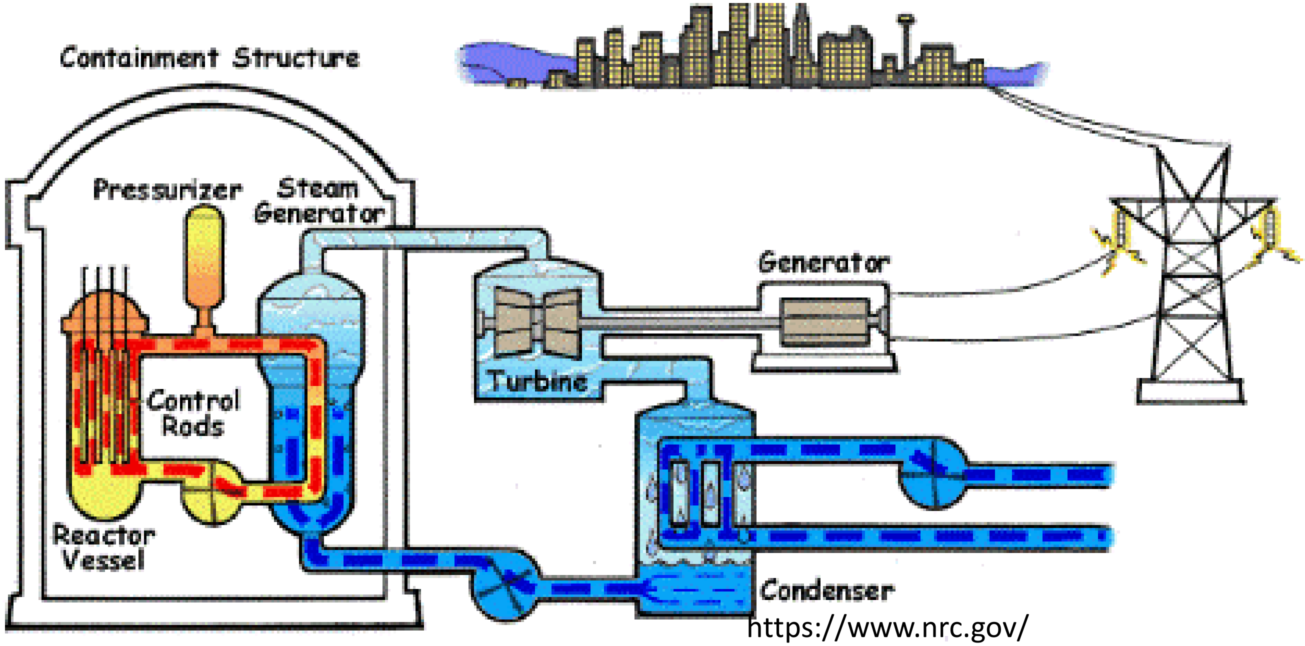
INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUIDOS

Motivação

Termohidraulica dos reatores é o estudo do fluxo hidráulico em fluidos térmicos que ocorrem em um reator nuclear. Pode ser dividida principalmente em três partes: termodinâmica , mecânica dos fluidos e transferência de calor, mas muitas vezes estão intimamente ligadas entre si.

Um exemplo comum é a geração de vapor em usinas de energia e a transferência de energia associada ao movimento mecânico e a mudança de estado da água durante esse processo. A análise termohidráulica pode determinar parâmetros importantes para o projeto do reator, como a eficiência da planta e capacidade de refrigeração do sistema.

Akimoto, Hajime; Anoda, Yoshinari; Takase, Kazuyuki; Yoshida, Hiroyuki; Tamai, Hidesada (2016). Nuclear Thermal Hydraulics. An Advanced Course in Nuclear Engineering. ***4****.* doi:10.1007/978-4-431-55603-9

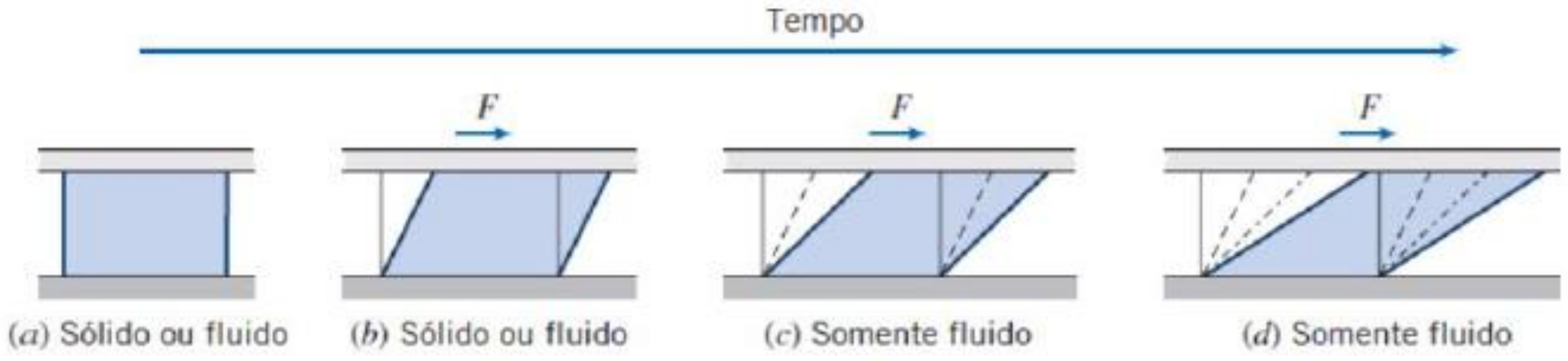


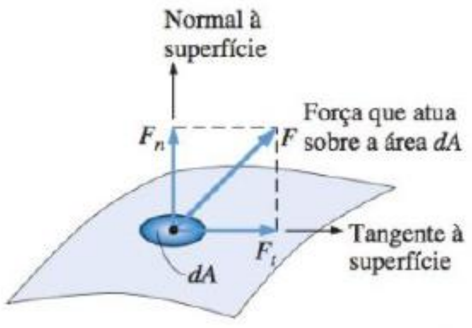
https://www.nrc.gov/

INTRODUÇÃO À MECÂNICA DOS FLUIDOS

Conceitos Importantes:

"Um **fluido** é uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importando o quão pequeno seja o seu valor". Uma vez que o fluido continua a escoar sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, definimos um fluido como uma substância que não pode sustentar uma tensão de cisalhamento quando em repouso.





Fonte: Çengel e Cimbala, 2015

Propriedades dos Fluidos

Qualquer característica de um sistema é denominada **propriedade**. Essas propriedades podem ir desde **pressão** , **temperatura**, **volume**, **massa, viscosidade**, **condutividade térmica**, **módulo de elasticidade**, **coeficiente de expansão térmica**, **resistividade elétrica**, **velocidade** etc.

As propriedades de um sistema podem ser classificadas como **intensivas** ou **extensivas**.

As propriedades intensivas são as independentes da massa do sistema, tais como temperatura, pressão e densidade. **As propriedades extensivas são aquelas que dependem da extensão ou do tamanho do sistema** como, por exemplo, massa total, volume total e momento total. Propriedades extensivas por unidade de massa são chamadas de propriedades específicas.

É importante ter em mente que, segundo o postulado de estado, **o estado de um sistema compressível simples é completamente definido por duas propriedades intensivas independentes**.

Classificação dos Escoamentos

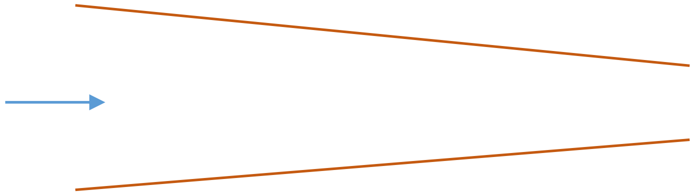
Classificação dos escoamentos: em relação à geometria, à variação no tempo, ao movimento de rotação, à variação da trajetória, à direção da trajetória, à compressibilidade, à presença da viscosidade e a limitações.

Em relação à **geometria**:

• **Escoamento Unidimensional**: São escoamentos em que as grandezas de interesse são funções de uma dimensão;
• **Escoamento Bidimensional**: São escoamentos em que as grandezas de interesse são funções de duas dimensões, ou de três dimensões com uma simetria;
• **Escoamento Tridimensional**: São escoamentos em que as grandezas de interesse são funções de três dimensões.

Em relação à **variação no tempo**:

• **Escoamento Permanente:** São escoamentos em que as grandezas e propriedades de interesse não possuem dependência com o tempo;
• **Escoamento Transiente:** São escoamentos em que as grandezas e propriedades de interesse possuem dependência com o tempo.



Classificação dos Escoamentos

Em relação ao movimento de rotação:

- **Escoamento Rotacional**: são escoamentos em que cada linha de corrente possui energia total distinta da outra;
- **Escoamento Irrotacional**: são escoamentos em que todas as linhas de corrente possuem a mesma energia.

Em relação à variação da trajetória:

- **Escoamento Uniforme** ou Bem Desenvolvido: são escoamentos em que todos os pontos de uma mesma trajetória possuem a mesma velocidade;
- **Escoamento Variado**: são escoamentos em que os pontos de uma mesma trajetória não possuem a mesma velocidade;

Em relação à direção da trajetória:

- **Escoamento Laminar:** são escoamentos em que o movimento do fluido é altamente ordenado, caracterizado por camadas suaves do fluido;
- **Escoamento Turbulento:** são escoamentos em que o movimento do fluido é altamente desordenado, caracterizado por **Escoamento de Transição:** são escoamentos em que apresentam passagem do escoamento laminar para o turbulento ou vice-versa.

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Considere o escoamento de um fluido sobre uma superfície ou placa plana, conforme ilustrado a seguir.

O fluido tem um perfil uniforme de velocidades (retangular) antes de atingir a placa.

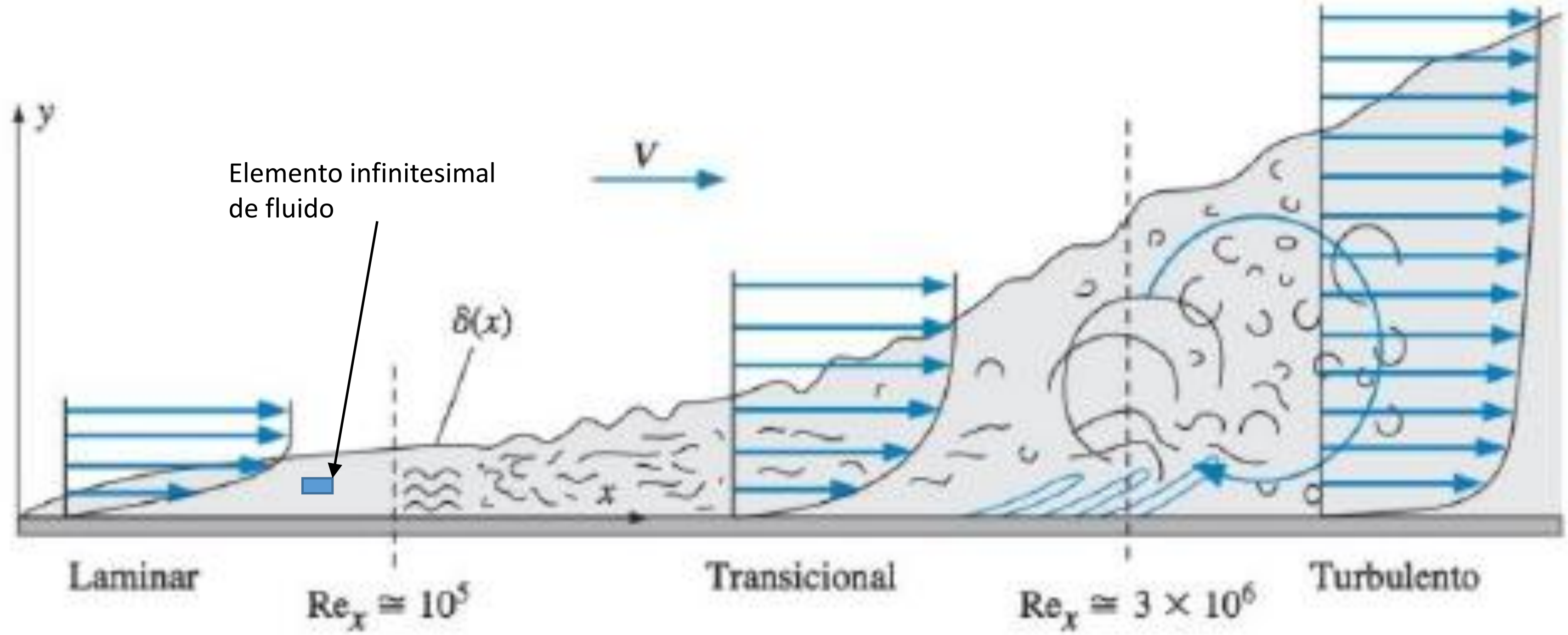
Quando o fluido atinge a borda de ataque, o atrito viscoso vai desacelerar as porções de fluido adjacentes à placa, dando início a uma camada limite laminar, cuja espessura cresce à medida que o fluido escoa ao longo da superfície.

A camada limite laminar vai crescer continuamente até que instabilidades vão induzir a uma transição de regime para dar início ao regime turbulento, se a placa for comprida o suficiente.

Admite-se que a transição do regime de escoamento laminar para turbulento ocorra para a seguinte condição:

$$\mathrm{Re}_{x\,transição} = \frac{u_\infty x \rho}{\mu} > 5\times 10^5 \text{ (às vezes também se usa } 3\times 10^5\text{)}.$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana



Fonte: Çengel e Cimbala, 2015

A **camada limite hidrodinâmica** é uma região de influência da presença de um corpo em um escoamento. Seu surgimento ocorre pelo princípio da aderência que indica que a camada de um fluido exatamente em contato com um corpo, com espessura de ordem de grandeza microscópica, fica aderida ao corpo e experimenta uma velocidade relativa nula em relação ao mesmo. Isso se dá pela atração molecular (fluido e corpo) e as camadas de fluido adjacentes têm velocidade influenciada pela viscosidade do fluido. (ÇENGEL, 2015; POTTER, 2018 e WHITE, 2018).

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

No regime laminar, o fluido escoa como se fossem “lâminas” deslizantes, sendo que a tensão de cisalhamento (originária do atrito entre essas camadas) para um fluido newtoniano (como o ar, água e óleo) dada por:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

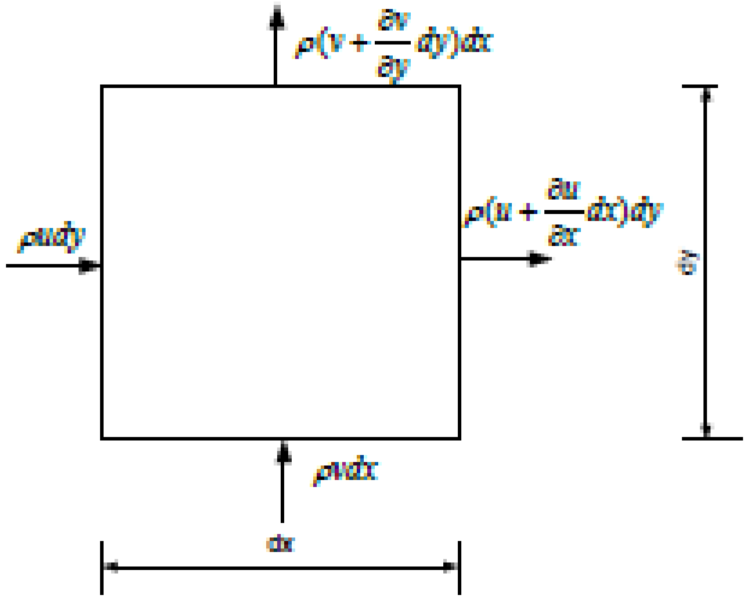
Equações da continuidade e quantidade de movimento na camada limite laminar

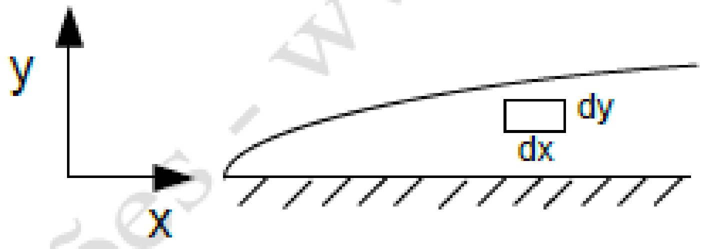
Hipóteses principais:

- Fluido incompressível
- Regime permanente
- Pressão constante na direção perpendicular à placa
- Propriedades constantes
- Força de cisalhamento na direção y constante

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Equação da continuidade ou da conservação de massa.





Como $\dot{m}_{sai} = \dot{m}_{entra}$, então substituindo os termos, vem:

$$\rho u dy + \rho v dx = \rho(u+\frac{\partial u}{\partial x}dx)dy + \rho(v+\frac{\partial v}{\partial y}dy)dx\,.$$

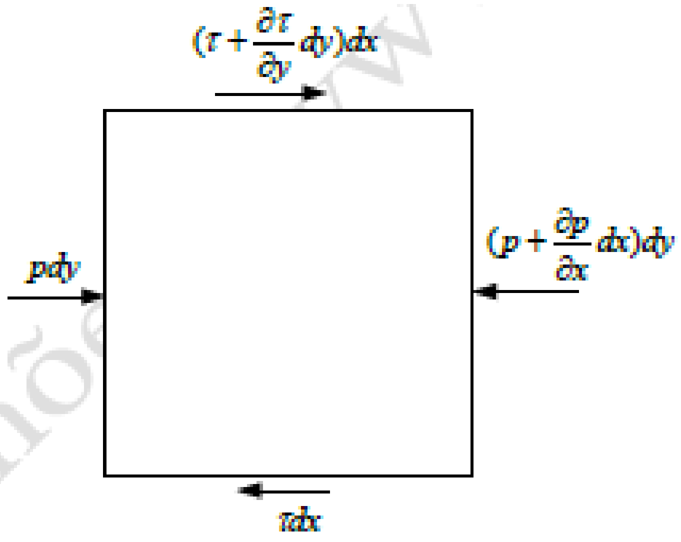
$$\boxed{\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0} \quad \text{ou} \quad \boxed{Div\vec{V}=0}$$

$$Div=\vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x}+\vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y}\,.$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Equação da conservação da quantidade de movimento

Da 2ª lei de Newton, tem-se que $\sum \vec{F}_{ext} =$ Variação do fluxo da quantidade de movimento



$$\sum F_x = pdy + (\tau + \frac{\partial \tau}{\partial y} dy)dx - \tau dx - (p + \frac{\partial p}{\partial x} dx)dy$$

ou, simplificando,

$$\sum F_x = \frac{\partial \tau}{\partial y} dxdy - \frac{\partial p}{\partial x} dxdy$$

Mas, se

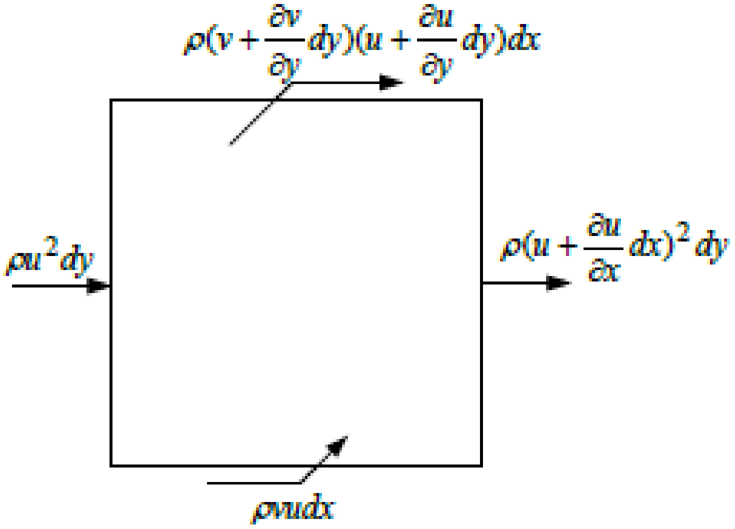
$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Então,

$$\sum F_x = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dxdy - \frac{\partial p}{\partial x} dxdy$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Na direção x:



$$= \rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)dxdy + \rho u \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}\right)}_{=0\ continuidade} dxdy = \rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right)dxdy$$

=

$$\sum F_x = \mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}dxdy - \frac{\partial p}{\partial x}dxdy$$

Portanto, agora podemos igualar os termos de resultante das forças externas com a variação do fluxo da quantidade de movimento, resultando na seguinte equação:

$$\boxed{\rho\left(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}\right) = \mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{\partial p}{\partial x}}$$

Se o escoamento se der à pressão constante, aquela equação pode ainda ser reescrita como:

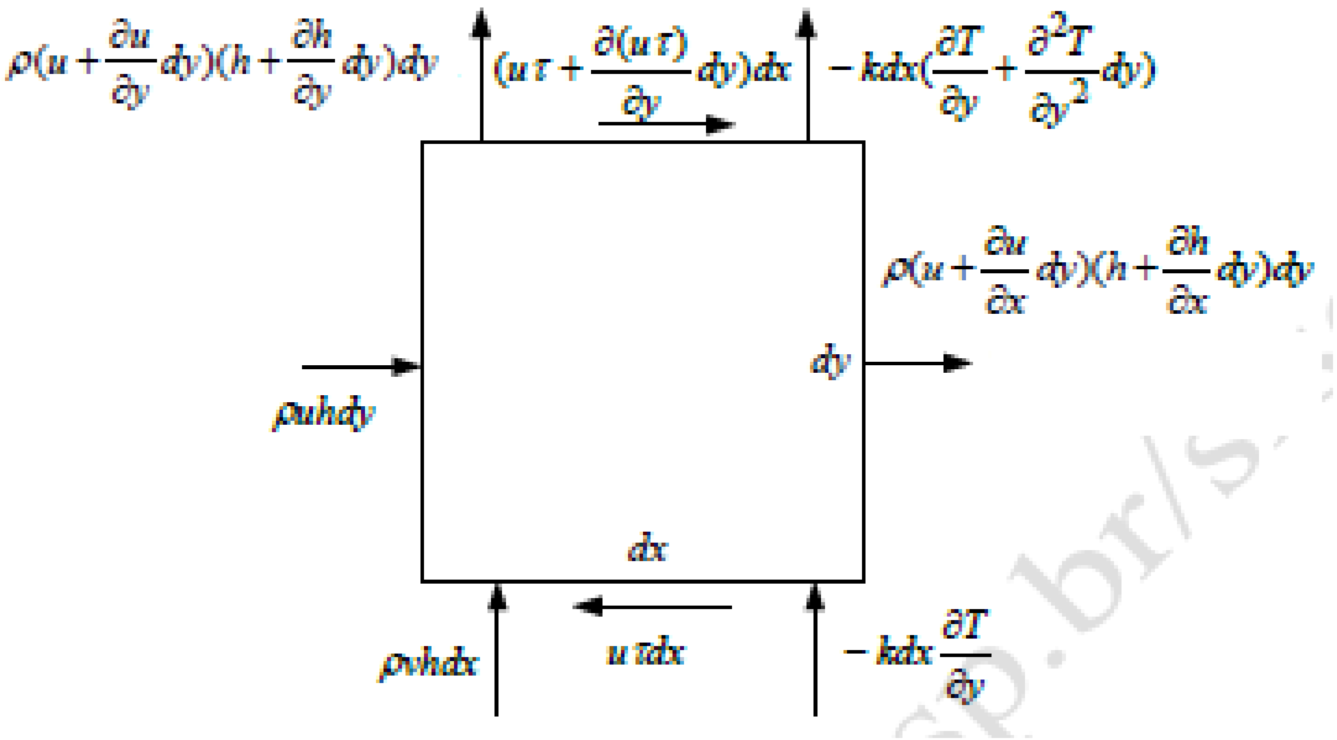
$$\boxed{u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y} = \upsilon\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}}$$

onde, $\upsilon = \frac{\mu}{\rho}$ é a viscosidade cinemática

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Equação da conservação da energia, ou primeira lei da termodinâmica

- Condução na direção x desprezível
- Energia cinética desprezível face à entalpia



Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Fluxo de energia que entra no volume de controle diferencial na unidade de tempo	**+**	**Trabalho líquido realizado na unidade de tempo**	**=**	**Fluxo de energia que sai do volume de controle diferencial na unidade de tempo**

Fluxo de energia que entra:

Entalpia + Condução de calor (note que a condução na direção x é desprezível – não é verdade no caso de metais líquidos)

$$\rho v h dx + \rho u h dy - k dx \frac{\partial T}{\partial y}$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Taxa de trabalho na unidade de tempo (potência térmica gerada pelas forças viscosas):

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(u\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)dxdy$$

Fluxo de energia que entra:

$$\rho(v+\frac{\partial v}{\partial y}dy)(h+\frac{\partial h}{\partial y}dy)dx+\rho(u+\frac{\partial u}{\partial x}dx)(h+\frac{\partial h}{\partial x}dx)dy-kdx(\frac{\partial T}{\partial y}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}dy)$$

Desprezado os termos de ordem superior

$$0-0+\frac{\partial}{\partial y}\left(u\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)dydx=\rho u\frac{\partial h}{\partial x}dxdy+\rho h\frac{\partial u}{\partial x}dxdy+\rho v\frac{\partial h}{\partial y}dxdy+\rho h\frac{\partial v}{\partial y}dxdy-k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}dxdy$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(u\mu\frac{\partial u}{\partial y}\right)=\rho u\frac{\partial h}{\partial x}+\rho v\frac{\partial h}{\partial x}+\rho h\underbrace{(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y})}_{=0\ continuidade}-k\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Estabelecendo que $\partial h = c_p \partial T$

E substituindo todos os termos da equação, temos:

$$\boxed{\rho c_p u \frac{\partial T}{\partial x} + \rho c_p v \frac{\partial T}{\partial y} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial y}\left(u\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right)}$$

Em geral a potência térmica gerada pelas forças viscosas (último termo) é desprezível face ao termo da condução de calor e de transporte convectivo de energia (entalpia).
Isso ocorre a baixas velocidades. Assim, a equação da energia pode ser simplificada para:

$$\boxed{u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}}$$

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Em resumo, as três equações diferenciais que regem a transferência de calor na camada limite laminar são:

Conservação de massa	$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}=0$
Conservação da quantidade de movimento direção *x*	$\rho(u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y})=\mu\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}-\frac{\partial p}{\partial x}$ $u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}=\upsilon\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$ *Pressão constante*
Conservação de energia	$u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}=\alpha\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$

A solução analítica das camadas limites laminares hidrodinâmica e térmica no Apêndice B do *Holman* e item 7.2 do *Incropera* (Solução de Blasius) nos fornecem resultados importantes para avaliação dos fenômenos que envolvem esses tipos de ecoamentos.

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Principais resultados para camada limite laminar:

Espessura da camada limite hidrodinâmica (CLH): $\delta = \dfrac{5x}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}$;

Coeficiente local de atrito local: $c_{f,x} = 0{,}664\,\mathrm{Re}_x^{-1/2}$;

Coeficiente local de atrito médio desde a borda de ataque:

$$\bar{c}_{f,L} = \frac{1}{L}\int_0^L C_{f,x}dx = 2\times C_{f_{x=L}} = 1{,}328\,Re_L^{-1/2};$$

Razão entre as espessuras das camadas limites hidrodinâmica (CLH) e térmica (CLT):

$$\frac{\delta}{\delta_t} = \mathrm{Pr}^{1/3};$$

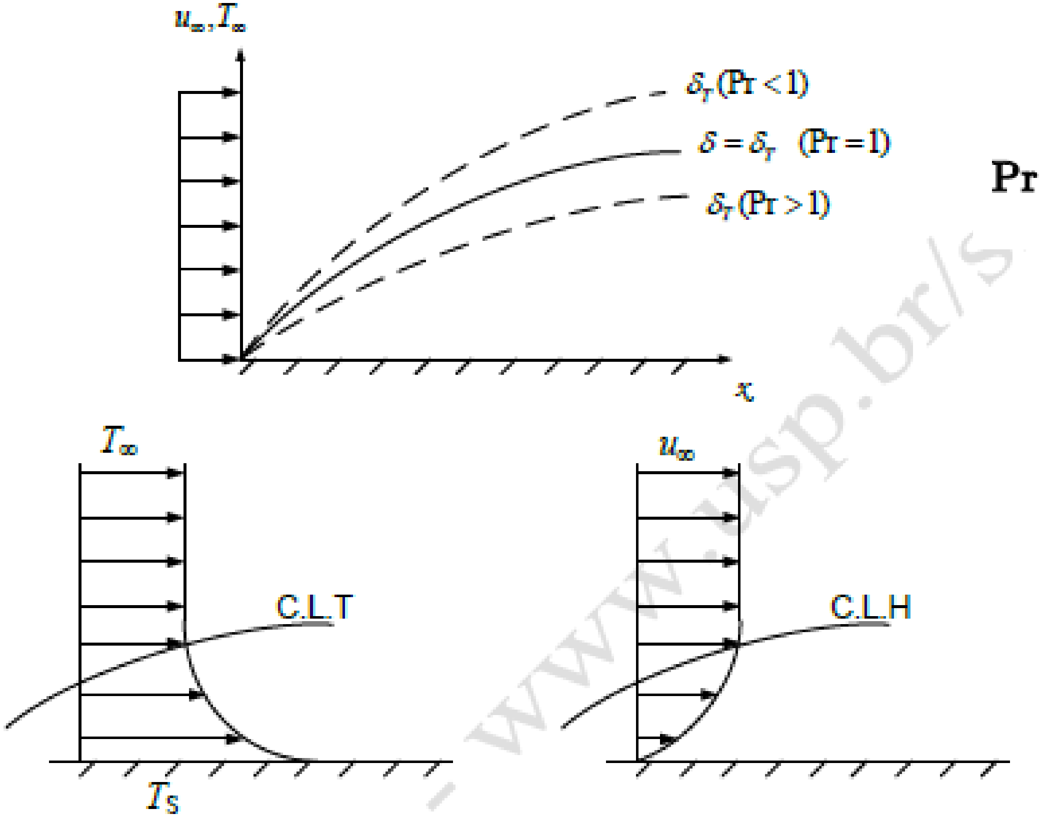
Número de Nusselt local: $Nu_x = 0{,}332\,\mathrm{Re}_x^{1/2}\,\mathrm{Pr}^{1/3} \quad 0{,}6 \le \mathrm{Pr} \le 50$

Número de Nusselt médio: $\overline{Nu}_L = \dfrac{1}{L}\displaystyle\int_0^L Nu_x dx = 2\times Nu_{x=L} = 0{,}664\,Re_L^{1/2}\,Pr^{1/3}$.

Definição do coeficiente de atrito: $c_f = \dfrac{\tau_s}{\rho u_\infty^2/2}$, τ_s *tensão de cisalhamento na parede*

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Os gráficos abaixo indicam o comportamento das camadas limites. Note que o **número de Prandtl (Pr)** desempenha um papel importante no crescimento relativo das camadas limites hidrodinâmica (CLLH) , e também na térmica (CLLT).
Quando Pr é maior ou igual à unidade, o que corresponde à grande parte dos líquidos e gases (para o ar Pr ~ 0,7), a camada limite laminar hidrodinâmica é mais espessa que a camada limite laminar térmica.
Para metais líquidos Pr < 1 e, nesses casos, a CLLT se desenvolve mais lentamente que a CLLH.



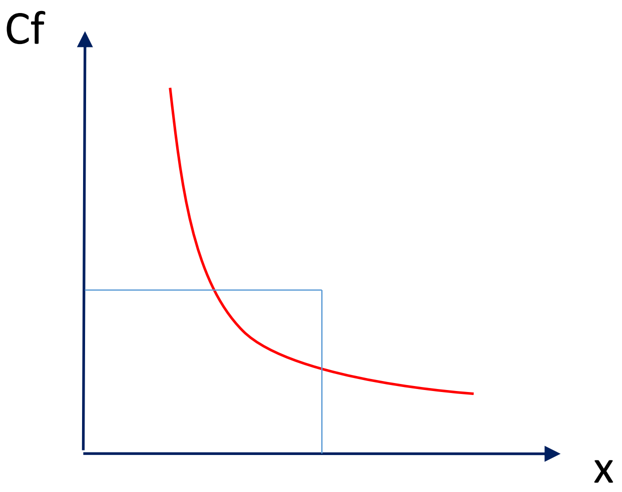
$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\text{taxa difusao viscosa}}{\text{taxa de difusao termica}} = \frac{c_p \mu}{k}$$

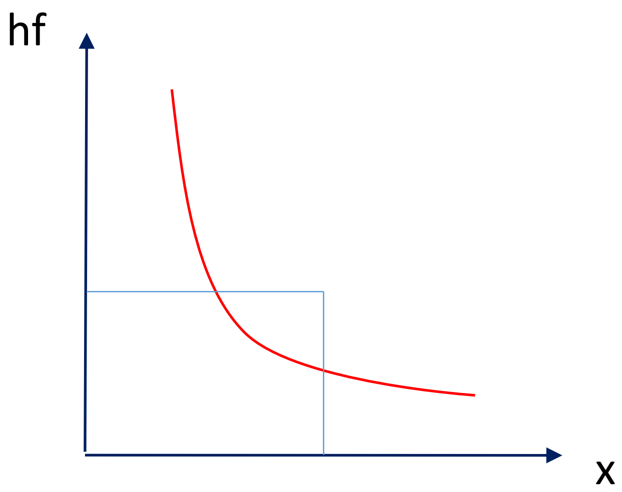
Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Coeficiente de atrito local: $C_{f,x} \propto \dfrac{1}{\sqrt{x}}$;

Coeficiente local de transferência de calor: $h_{f,x} \propto \dfrac{1}{\sqrt{x}}$.

Note que ambos decaem a partir da borda de ataque da placa plana com o inverso da raiz quadrada da distância dessa borda

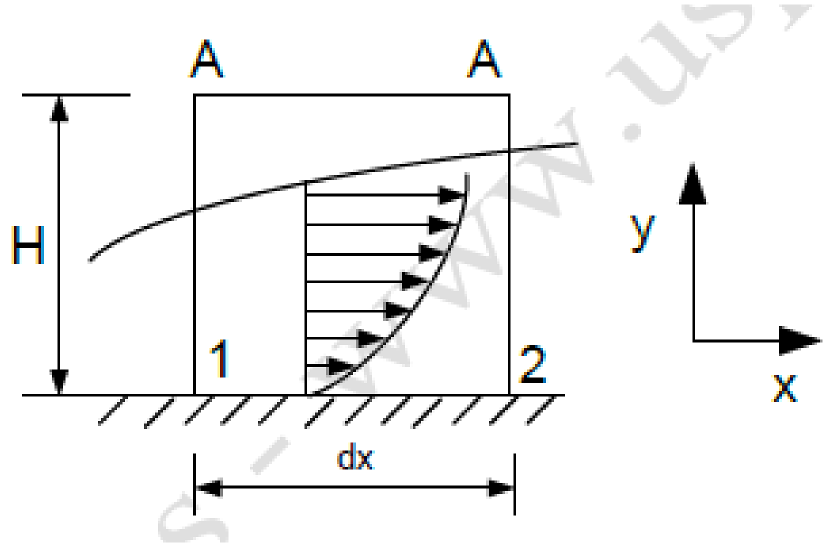




Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Solução Integral ou Aproximada de Von Karman

Neste caso, define-se um volume de controle diferencial apenas na direção x paralela ao escoamento, cuja altura H se estenda para além da camada limite, isto é, H > δ , conforme ilustrado na figura abaixo.



Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Equações de Continuidade de Massa, Fluxo de Quantidade de Movimento:

Conservação de massa

Fluxo mássico na face 1 – A: $\int_0^H \rho u dy$

Fluxo mássico na face 2 – A: $\int_0^H \rho u dy + \frac{d}{dx}\left(\int_0^H \rho u dy\right)dx$

Fluxo mássico na face A – A: $\frac{d}{dx}\left(\int_0^H \rho u dy\right)dx$

Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\boxed{\rho \frac{d}{dx}\left(\int_0^{\delta} (u_\infty - u) u dy\right) = \mu \left.\frac{\partial u}{\partial y}\right|_{y=0}}$$

Se conhecemos U(y), então a equação pode ser integrada para se obter uma solução

Camada Limite Laminar sobre uma Placa ou Superfície Plana

Se admitirmos as seguintes condições de contorno:

$$u = 0 \qquad p/\,y = 0$$

$$u = u_\infty \qquad p/\,y = \delta$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \qquad p/\,y = \delta$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \qquad p/\,y = 0$$

Como são quatro as condições de contorno, uma distribuição que satisfaz estas condições de contorno é um polinômio do 3º grau, dado por:

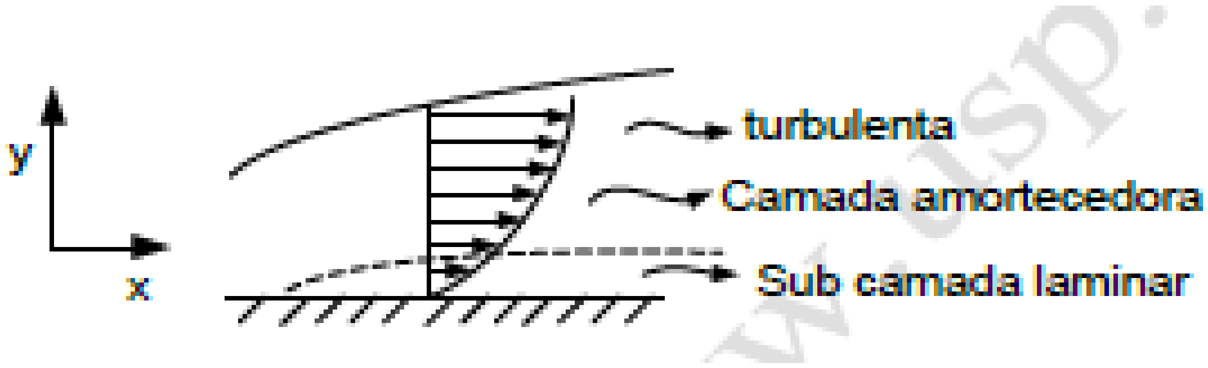
$$u(y) = C_1 + C_2 y + C_3 y^2 + C_4 y^3$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{\frac{u(y)}{u_\infty} = \frac{3}{2}\frac{y}{\delta} - \frac{1}{2}\left(\frac{y}{\delta}\right)^3} \quad \xrightarrow{\text{Integrando-se}} \quad \boxed{\frac{\delta(x)}{x} = \frac{4{,}64}{\sqrt{\mathrm{Re}_x}}}$$

Camada Limite Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

A transferência de calor convectiva na camada limite turbulenta é fenomenologicamente diferente da que ocorre na camada limite laminar. Para entender o mecanismo da transferência de calor na camada limite turbulenta.

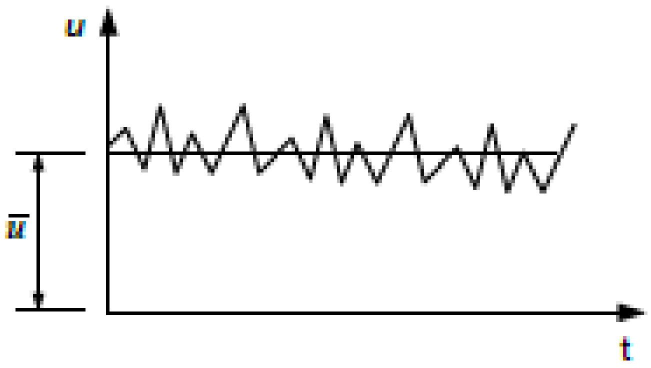


A CLT é subdividida em:

- Subcamada laminar – semelhante ao escoamento laminar – ação molecular
- Camada amortecedora – efeitos moleculares ainda são sentidas
- Turbulento – misturas macroscópicas de fluido

Camada Limite Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

Para entender os mecanismos turbulentos, considere o exercício de observar o comportamento da oscilação da velocidade local (isto é, em um ponto do escoamento).



"Problema da turbulência" divide-se a velocidade instantânea em dois componentes: um valor médio e outro de flutuação, como indicado:

- velocidade na direção paralela: $u = \overline{u} + u'$
- velocidade na direção transversal: $v = \overline{v} + v'$
- pressão local: $\underbrace{P}_{\substack{valor \\ instantâneo}} = \underbrace{\overline{P}}_{médio} + \underbrace{P'}_{flutuação}$

Camada Limite Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

Os termos de flutuação são responsáveis pelo surgimento de forças aparentes que são chamadas de **Tensões aparentes de Reynolds**.

Para se resolver as equações de continuidade é preciso obter médias temporais para cada propriedade.

Assim, para o regime turbulento, tem-se:

Eq. Conservação da Massa:

$$\overline{\cdot u'\left(\frac{\partial u'}{\partial x}+\frac{\partial v'}{\partial x}\right)}$$

Eq. Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\boxed{\overline{u}\frac{\partial \overline{u}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{u}}{\partial y}=\upsilon\frac{\partial^2 \overline{u}}{\partial y^2}-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \overline{P}}{\partial x}-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial x}}$$

Eq. Conservação da Energia:

$$\boxed{\rho C_p\left(\overline{u}\frac{\partial \overline{T}}{\partial x}+\overline{v}\frac{\partial \overline{T}}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial \overline{T}}{\partial y}-\rho C_p\overline{v'T'}\right)}$$

Camada Limite Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

A forma como o fluido escoa e interage com a superfície influencia diretamente no processo de transferência de calor entre eles.

As interações do fluido com a superfície e os processos de transferência de calor entre ambos serão avaliados mais adiante.

Camada Limite Laminar e Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

Exemplo 1:

Considere o **ar atmosférico** a uma temperatura de 20 ^oC escoando sobre uma placa plana de largura L = 4 m, com uma velocidade de corrente livre igual a U_∞ = 5 m/s.

a) Para **x** = 0,5 m determine a espessura da camada-limite.

b) Nesta mesma coordenada, estime a distância da superfície na qual u = 0,4 U_∞.

c) Repita os cálculos para a extremidade da placa (x = C), sabendo que a mesma, possui comprimento total C = 3 m.

d) Determine a força de arraste total devido ao atrito superficial.

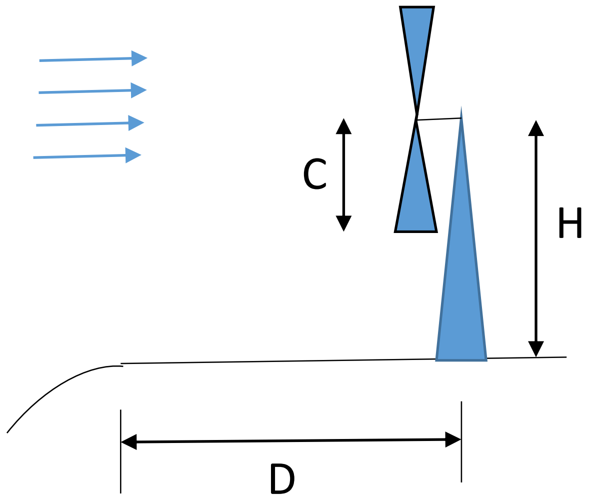
e) Determine a força de arraste que atua na primeira metade da placa.

f) Se fosse **água** (20 ^oC) escoando na mesma velocidade, qual seria o máximo comprimento **x** para o qual o escoamento fosse considerado laminar?

Camada Limite Laminar e Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

Exemplo 2:

Deseja-se instalar um gerador eólico para gerar energia elétrica em um planalto que recebe um vento constante de 40 Km/h. Determine a altura (H) da torre do gerador de forma a obter o rendimento máximo, que ocorre quando a velocidade é constante. Sabe-se que as pás possuem comprimento C = 4 m e que a torre está localizada a uma distância D = 1.000 m do início do planalto. Sabe-se que, para o ar, ρ = 1,2 kg/m^3 e μ = 1,7 x 10^{-5} kg/(ms).



Camada Limite Turbulenta sobre uma Placa ou Superfície Plana

Referências Bibliográficas:

1. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações (Português), 2015, Edição Português por Yunus A. Çengel (Autor), John M. Cimbala (Autor), Fábio Saltara (Tradutor), Karl Peter Burr (Tradutor), Jorge Luis Baliño (Tradutor);

2. Introdução à Mecânica dos Fluidos - 9ª Ed. 2018, Fox, Robert W. - McDonald, Alan T. - Pritchard, Philip J. - Mitchell, John W., Ed. LTC

3. Notas de aula de PME 3361 – Processos de Transferência de Calor , 2018, J. R. Simões-Moreira, Apostila.

4. Akimoto, Hajime; Anoda, Yoshinari; Takase, Kazuyuki; Yoshida, Hiroyuki; Tamai, Hidesada (2016). Nuclear Thermal Hydraulics. An Advanced Course in Nuclear Engineering. **4**. doi:10.1007/978-4-431-55603-9