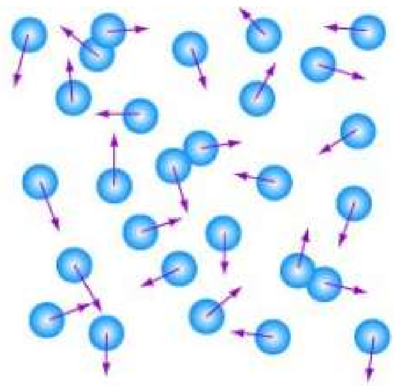
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
Campus Araranguá - ARA
Departamento de Energia e Sustentabilidade

UNIDADE 2
CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O fluido como um contínuo

Aparentemente, o fluido é um meio contínuo e o tratamos como tal na maior parte das aplicações de engenharia.

Isso significa que cada propriedade do fluido tem valores definidos em cada ponto do espaço. Propriedades como massa específica, temperatura e velocidade são funções contínuas do espaço e do tempo.



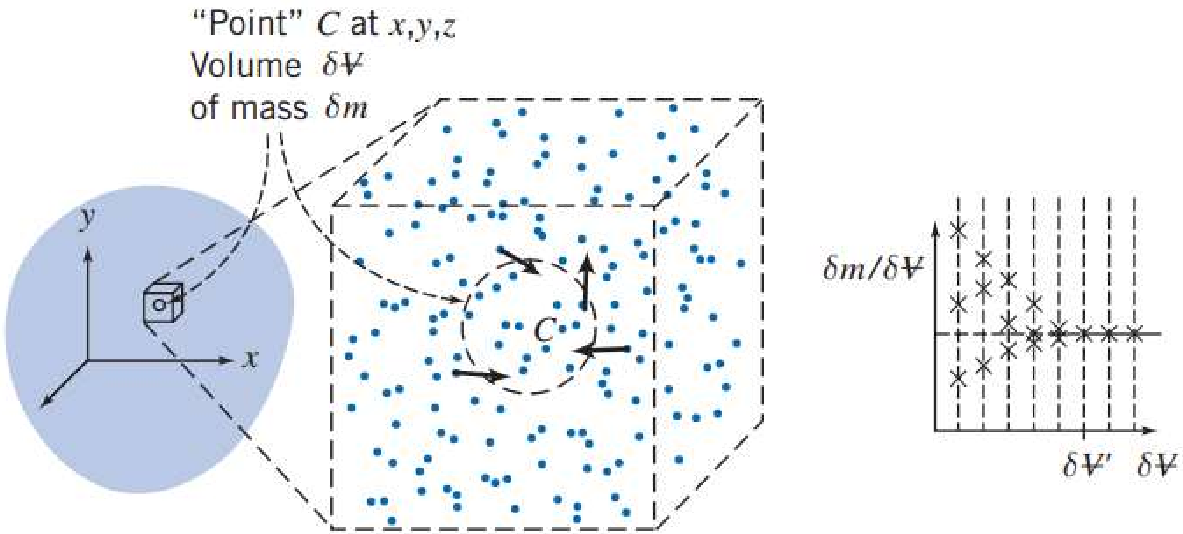
No entanto, do ponto de vista microscópico, há moléculas de fluido em constante movimento.

Como definimos o conceito de propriedade em um ponto?

O fluido como um contínuo

Determinação da massa específica no ponto C:

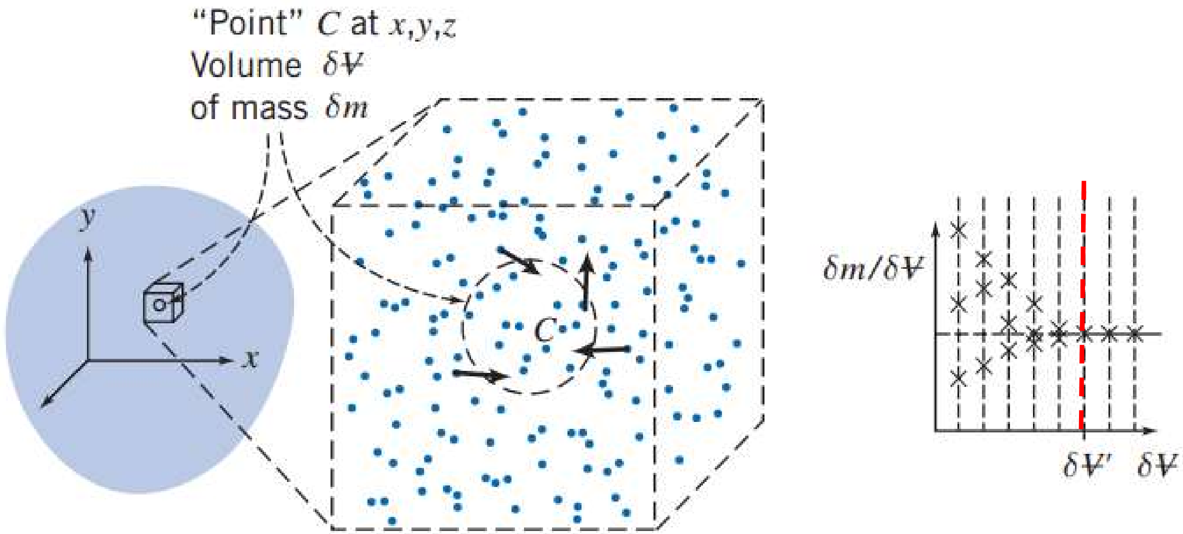
$$\rho = \lim_{\delta \forall \to \delta \forall'} \frac{\delta m}{\delta \forall}$$



O fluido como um contínuo

Determinação da massa específica no ponto C:

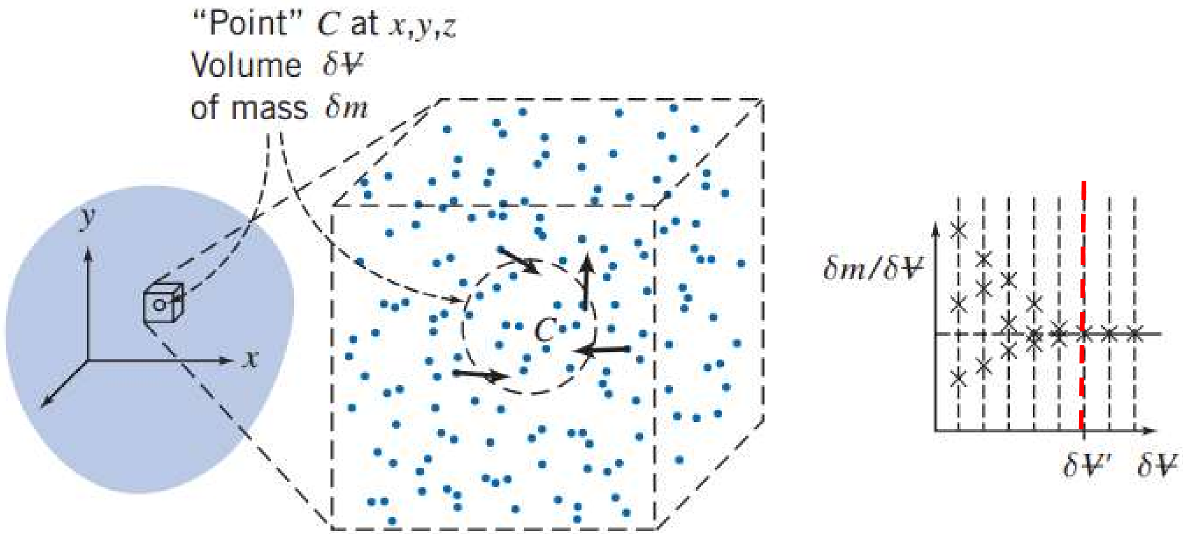
$$\rho = \lim_{\delta\forall \to \delta\forall'} \frac{\delta m}{\delta\forall}$$



O fluido como um contínuo

Determinação da massa específica no ponto C:

$$\rho = \lim_{\delta\forall \to \delta\forall'} \frac{\delta m}{\delta\forall}$$



- 1 m³ de ar
  2,5 x 10^{25} moléculas

- 10^{-12} m³ de ar (cubo 0,1 mm)
  2,5 x 10^{13} moléculas

Campos de escoamento

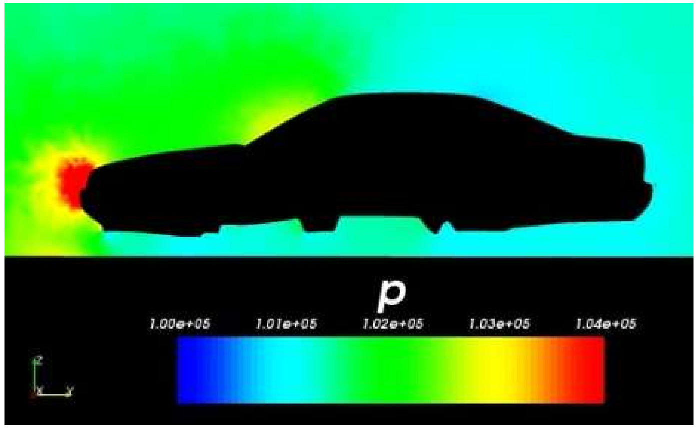
Como consequência da teoria do contínuo, cada propriedade tem um valor definido em cada "ponto" do espaço. No caso da massa específica, temos:

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

o que configura o campo de uma grandeza escalar (**campo escalar**).

Outros exemplos de campo escalar:

$$T = T(x, y, z, t) \qquad p = p(x, y, z, t)$$



Campos de escoamento

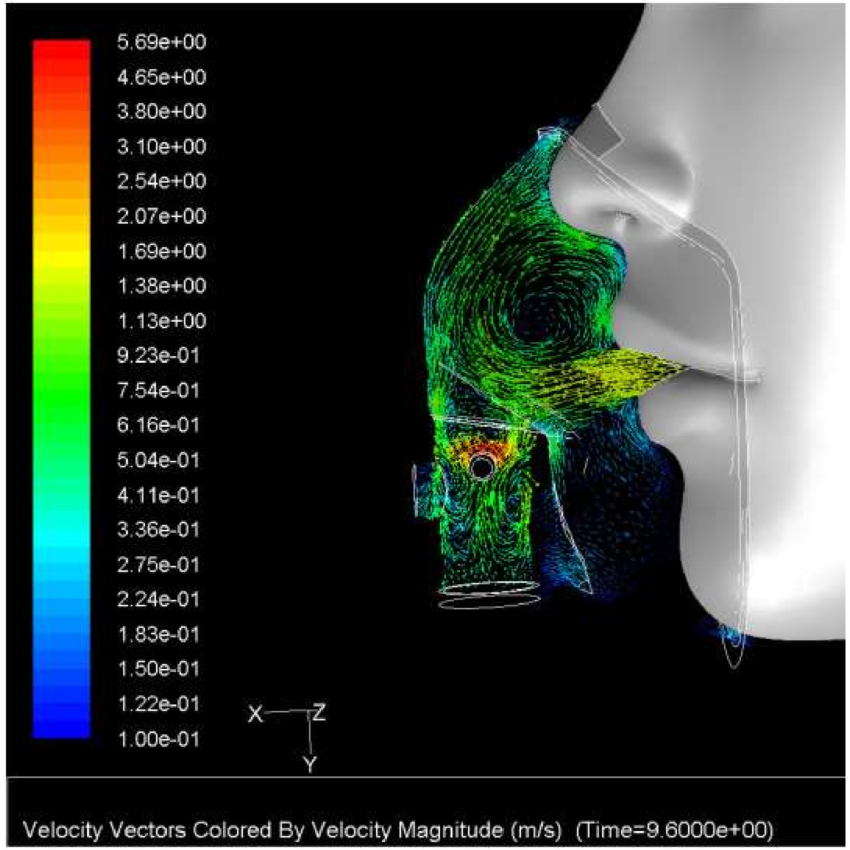
O mesmo se aplica a grandezas vetoriais (velocidade, por exemplo):

Aerosol Research and Engineering Laboratory Inc. "Computational Fluid Dynamics Modeling of Amsino OneMask™ Oxygen Mask" Project 10766.2 for Amsino International. 2013

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ representação de campo

$\vec{V} = u\hat{\imath} + v\hat{\jmath} + w\hat{k}$ representação em função de componentes escalares

u, v e w podem ou não ser função do tempo.



Campos de escoamento

O mesmo se aplica a grandezas vetoriais (velocidade, por exemplo):

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ representação de campo

$\vec{V} = u\hat{\imath} + v\hat{\jmath} + w\hat{k}$ representação em função de componentes escalares

u, v e w podem ou não ser função do tempo.

Se as propriedades em cada ponto do escoamento não variam com o tempo, dizemos que o escoamento está em **regime permanente**.

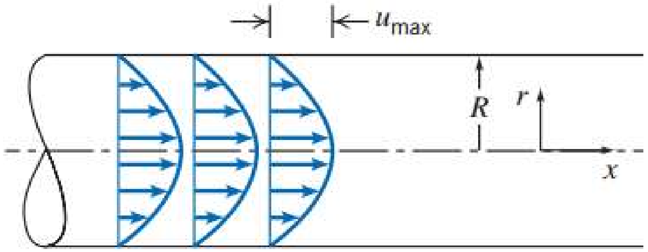
$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = 0$$

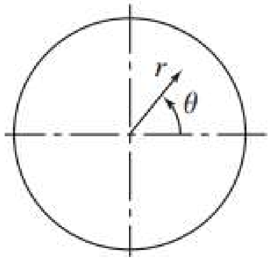
$$\eta = \rho, p, T, \vec{V} \ldots$$

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Um escoamento é classificado como uni, bi ou tridimensional de acordo com o número de coordenadas espaciais necessárias para especificar seu campo de velocidade.

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ escoamento tridimensional e transiente

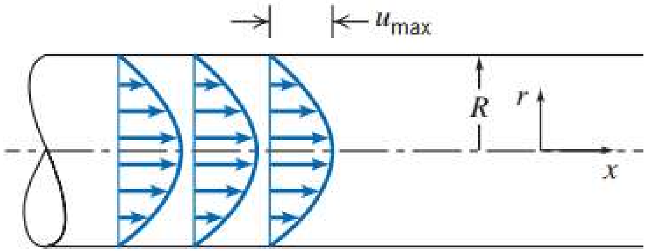


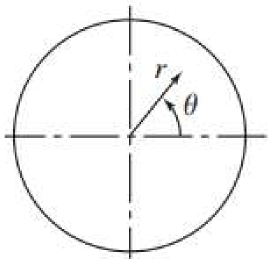


Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Um escoamento é classificado como uni, bi ou tridimensional de acordo com o número de coordenadas espaciais necessárias para especificar seu campo de velocidade.

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ escoamento tridimensional e transiente





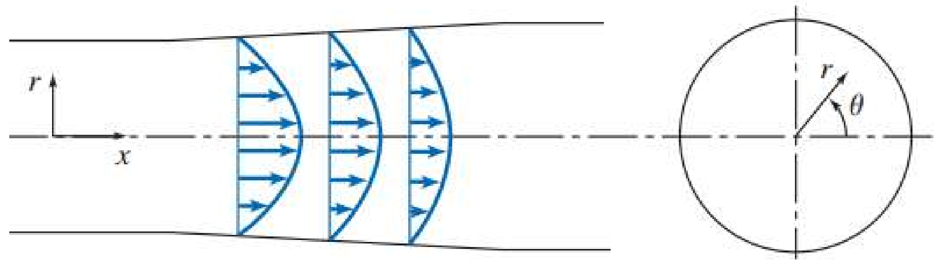
$\vec{V} = \vec{V}(r)$

unidimensional

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Um escoamento é classificado como uni, bi ou tridimensional de acordo com o número de coordenadas espaciais necessárias para especificar seu campo de velocidade.

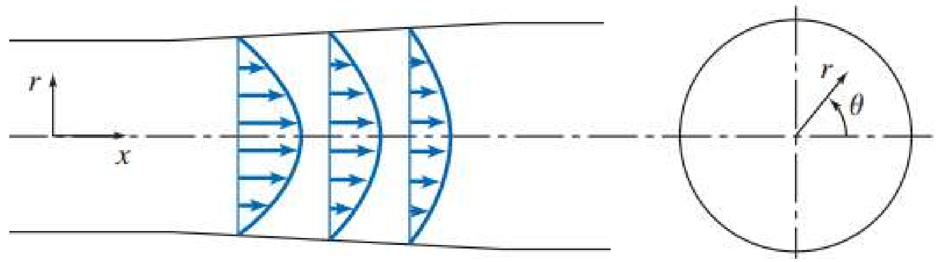
$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ escoamento tridimensional e transiente



Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Um escoamento é classificado como uni, bi ou tridimensional de acordo com o número de coordenadas espaciais necessárias para especificar seu campo de velocidade.

$\vec{V} = \vec{V}(x, y, z, t)$ escoamento tridimensional e transiente



$$\vec{V} = \vec{V}(r, x)$$

bidimensional

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Exercícios:

$$\vec{V} = 4x\hat{\imath} + 5y\hat{\jmath}$$

$$\vec{V} = 4xy\hat{\imath}$$

$$\vec{V} = \hat{\imath} - 5\hat{\jmath}$$

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Exercícios:

$\vec{V} = 4x\hat{\imath} + 5y\hat{\jmath}$ bidimensional

$\vec{V} = 4xy\hat{\imath}$

$\vec{V} = \hat{\imath} - 5\hat{\jmath}$

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Exercícios:

$\vec{V} = 4x\hat{\imath} + 5y\hat{\jmath}$ bidimensional

$\vec{V} = 4xy\hat{\imath}$ bidimensional

$\vec{V} = \hat{\imath} - 5\hat{\jmath}$

Escoamentos uni, bi e tridimensionais

Exercícios:

$\vec{V} = 4x\hat{\imath} + 5y\hat{\jmath}$ bidimensional

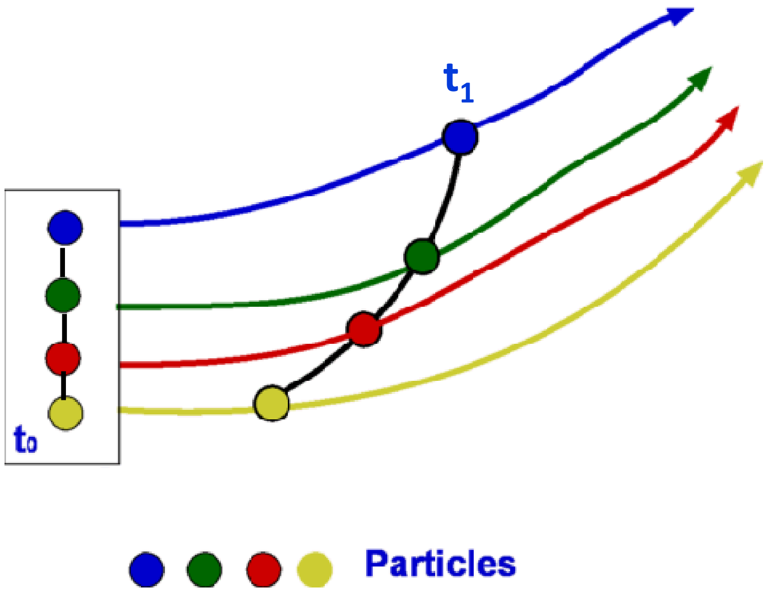
$\vec{V} = 4xy\hat{\imath}$ bidimensional

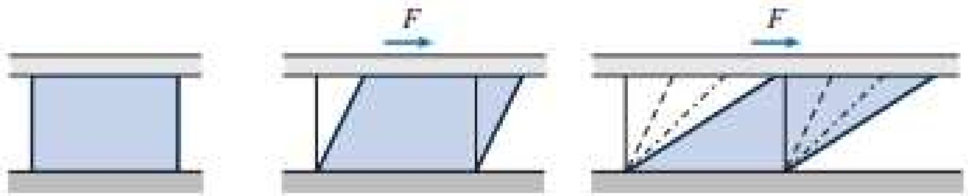
$\vec{V} = \hat{\imath} - 5\hat{\jmath}$ campo de escoamento uniforme

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Representação visual do campo de escoamento.

Linha de tempo: marcação em um dado instante de uma quantidade de partículas fluidas adjacentes no campo do escoamento.

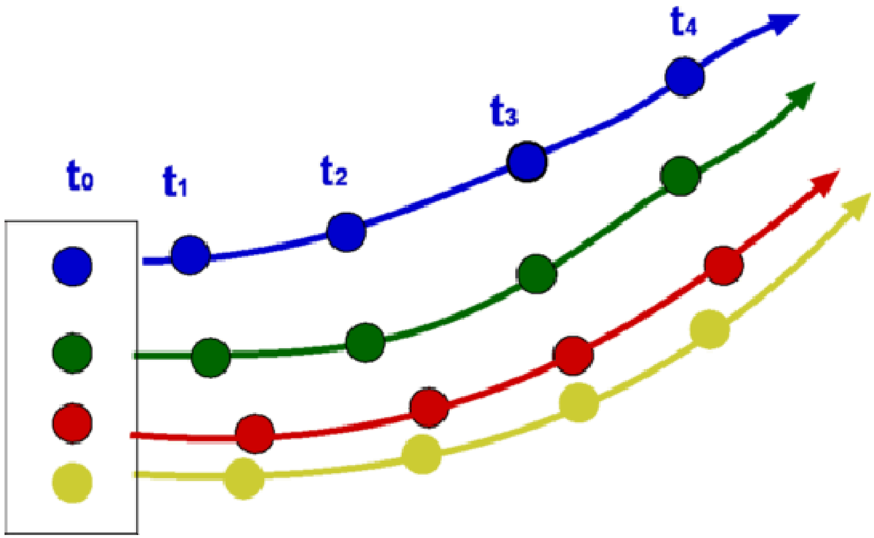




Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Linha de trajetória: caminho traçado por uma partícula fluida.

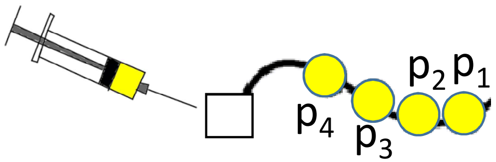
Forma de visualizar: corante + fotografia de exposição prolongada.

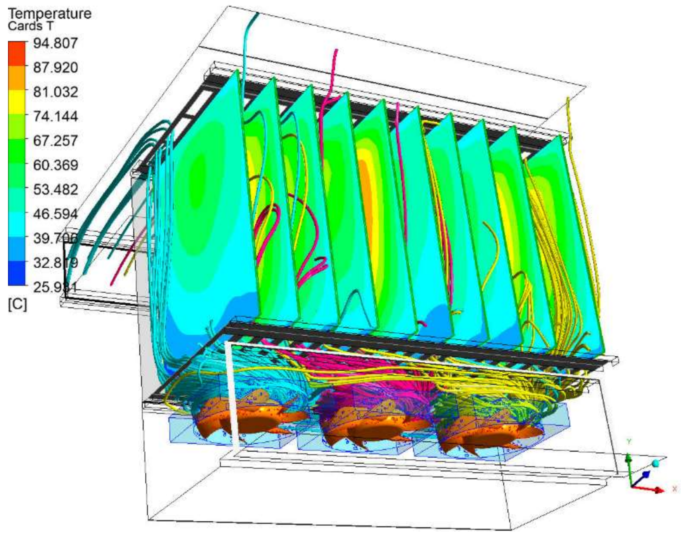


Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Linha de emissão: linha que une todas as partículas que passam por um ponto específico ao longo do tempo.

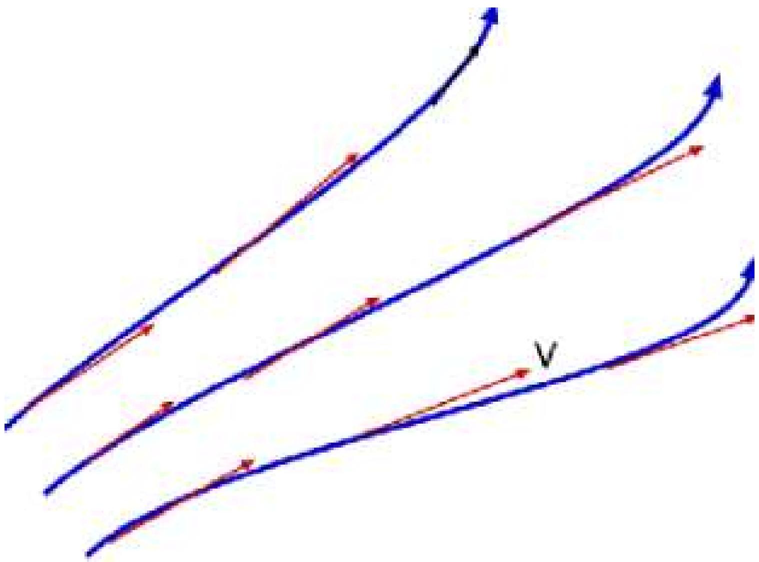
Forma de visualizar: injetar corante no ponto de interesse do escoamento.





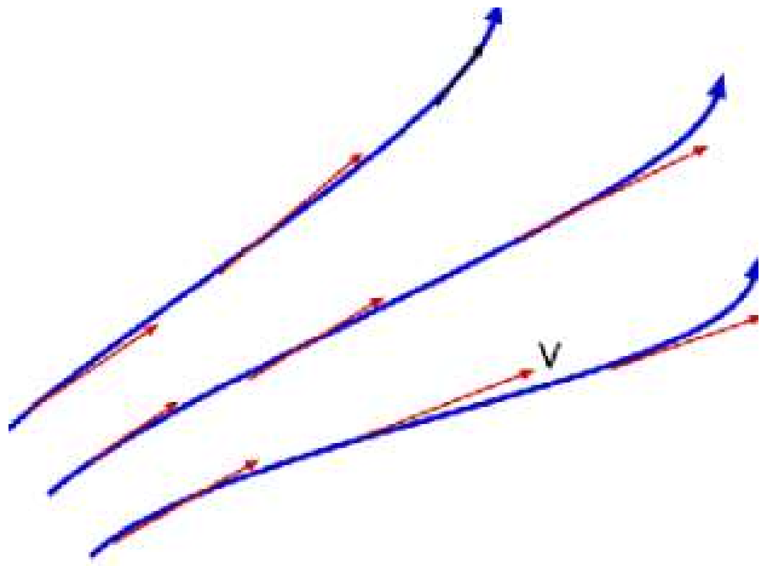
Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Linhas de corrente: linhas desenhadas no campo de modo que, em um dado instante, são tangentes à direção do escoamento em cada ponto.



Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

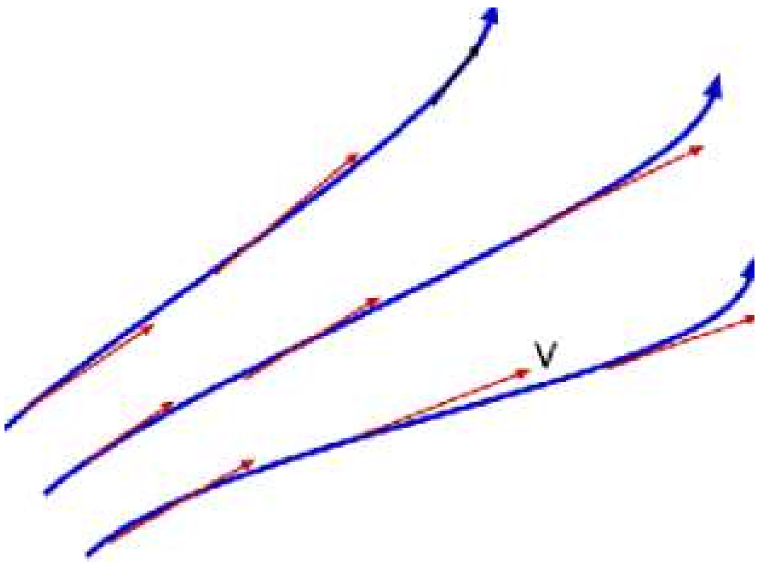
Linhas de corrente: linhas desenhadas no campo de modo que, em um dado instante, são tangentes à direção do escoamento em cada ponto.



Não há escoamento através das linhas de corrente

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Linhas de corrente: linhas desenhadas no campo de modo que, em um dado instante, são tangentes à direção do escoamento em cada ponto.



Não há escoamento através das linhas de corrente

Em regime permanente, as linhas de corrente, trajetória e emissão coincidem

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

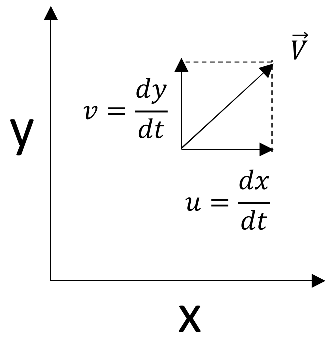
Exemplo: Dado o campo $\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$, determinar:

a) Linha de corrente que passa pelo ponto (1,1) em t = 1s;
b) Linha de trajetória da partícula que passou por (1,1) em t = 1s;
c) Linha de emissão das partículas que passaram pelo ponto (1,1) entre 0 e 1s.

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$\vec{V} = x(1 + 2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$

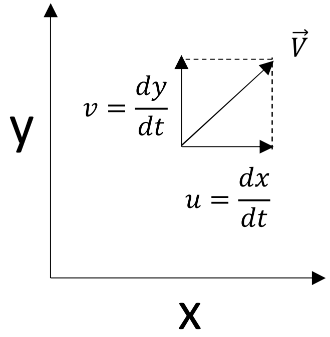
a) Para linha de corrente



Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

a) Para linha de corrente

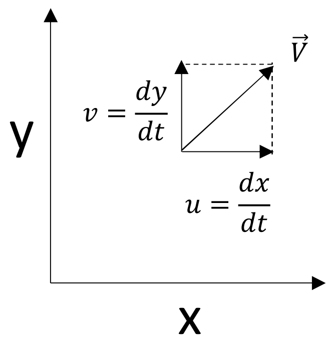


$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u}$$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

a) Para linha de corrente



$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u}$$

Como $u = x(1+2t)$ e $v = y$:

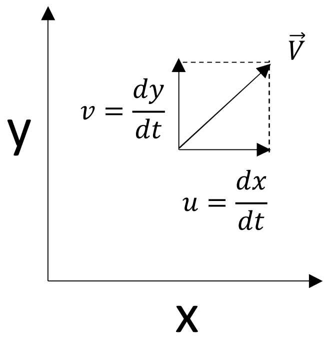
$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x(1+2t)} \longrightarrow \int_1^y \frac{dy}{y} = \int_1^x \frac{dx}{x(1+2t)}$$

$$\ln y = \frac{\ln x}{(1+2t)} \xrightarrow{t\,=\,1} \boxed{y = x^{1/3}}$$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$

a) Para linha de corrente

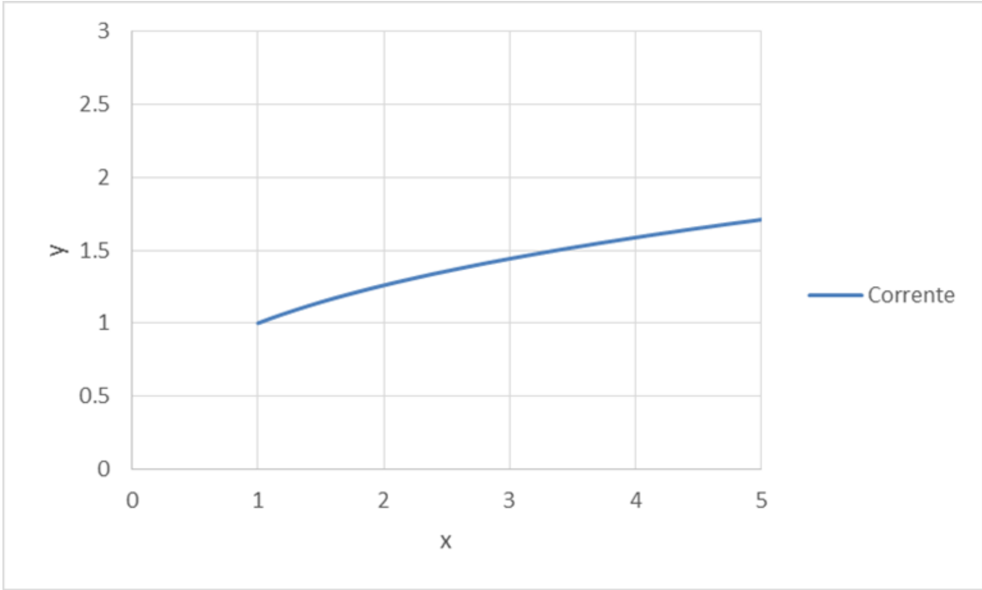


$$\frac{dy}{dx} = \frac{v}{u}$$

Como $u = x(1+2t)$ e $v = y$:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{y}{x(1+2t)} \longrightarrow \int_1^y \frac{dy}{y} = \int_1^x \frac{dx}{x(1+2t)}$$

$$\ln y = \frac{\ln x}{(1+2t)} \xrightarrow{t\,=\,1} \boxed{y = x^{1/3}}$$



Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Exemplo: Dado o campo $\vec{V} = x(1 + 2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$, determinar:

a) Linha de corrente que passa pelo ponto (1,1) em t = 1s;
b) Linha de trajetória da partícula que passou por (1,1) em t = 1s;
c) Linha de emissão das partículas que passaram pelo ponto (1,1) entre 0 e 1s.

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1 + 2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

b) Como o interesse é avaliar a trajetória da partícula, $u_p = u = \dfrac{dx}{dt}$; $v_p = v = \dfrac{dy}{dt}$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

b) Como o interesse é avaliar a trajetória da partícula, $u_p = u = \frac{dx}{dt}$; $v_p = v = \frac{dy}{dt}$

Assim, $\frac{dx}{dt} = x(1+2t)$; $\frac{dy}{dt} = y$

$$\int_1^x \frac{dx}{x} = \int_1^t (1+2t)dt \quad ; \quad \int_1^y \frac{dy}{y} = \int_1^t dt$$

$$x = e^{-2+[t(1+t)]} \; ; \; y = e^{t-1} \longrightarrow \boxed{x = y^{3+\ln y}}$$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

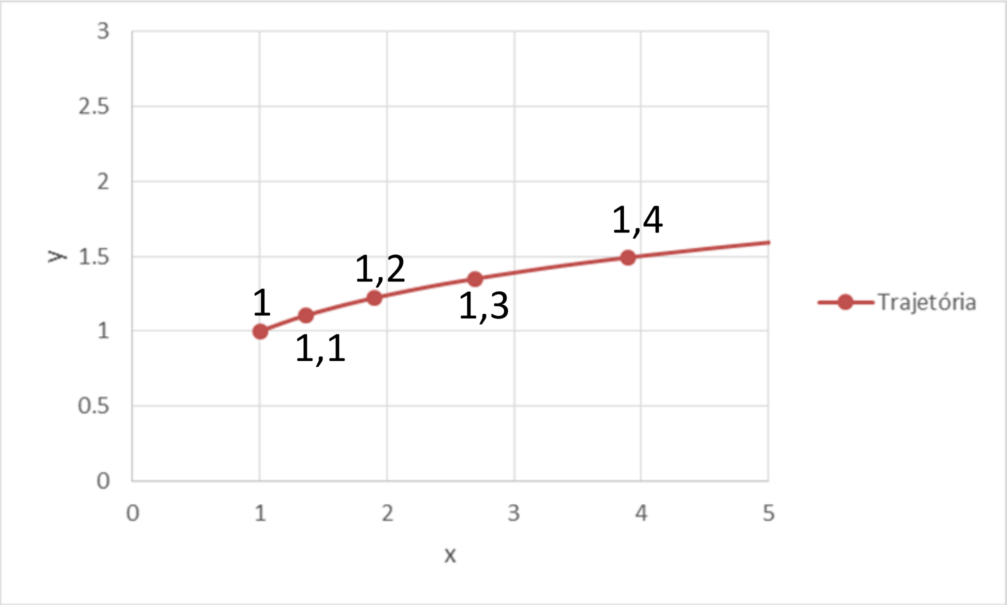
$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

b) Como o interesse é avaliar a trajetória da partícula, $u_p = u = \dfrac{dx}{dt}$; $v_p = v = \dfrac{dy}{dt}$

Assim, $\dfrac{dx}{dt} = x(1+2t)$; $\dfrac{dy}{dt} = y$

$$\int_1^x \frac{dx}{x} = \int_1^t (1+2t)dt \quad ; \quad \int_1^y \frac{dy}{y} = \int_1^t dt$$

$$x = e^{-2+[t(1+t)]} \;;\; y = e^{t-1} \longrightarrow \boxed{x = y^{3+\ln y}}$$



Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

Exemplo: Dado o campo $\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$, determinar:

a) Linha de corrente que passa pelo ponto (1,1) em t = 1s;
b) Linha de trajetória da partícula que passou por (1,1) em t = 1s;
c) Linha de emissão das partículas que passaram pelo ponto (1,1) entre 0 e 1s.

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

c) $u = \dfrac{dx}{dt}$; $v = \dfrac{dy}{dt}$ $\longrightarrow$ $\dfrac{dx}{dt} = x(1+2t)$; $\dfrac{dy}{dt} = y$

Separando variáveis e integrando, $\displaystyle\int_1^x \frac{dx}{x} = \int_{t_0}^t (1+2t)dt$; $\displaystyle\int_1^y \frac{dy}{y} = \int_{t_0}^t dt$

$x = e^{t(1+t)-t_0(1+t_0)}$; $y = e^{t-t_0}$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

c) $u = \dfrac{dx}{dt}$; $v = \dfrac{dy}{dt}$ $\longrightarrow$ $\dfrac{dx}{dt} = x(1+2t)$; $\dfrac{dy}{dt} = y$

Separando variáveis e integrando, $\displaystyle\int_1^x \frac{dx}{x} = \int_{t_0}^{t} (1+2t)dt$; $\displaystyle\int_1^y \frac{dy}{y} = \int_{t_0}^{t} dt$

$$x = e^{t(1+t)-t_0(1+t_0)} \quad ; \quad y = e^{t-t_0}$$

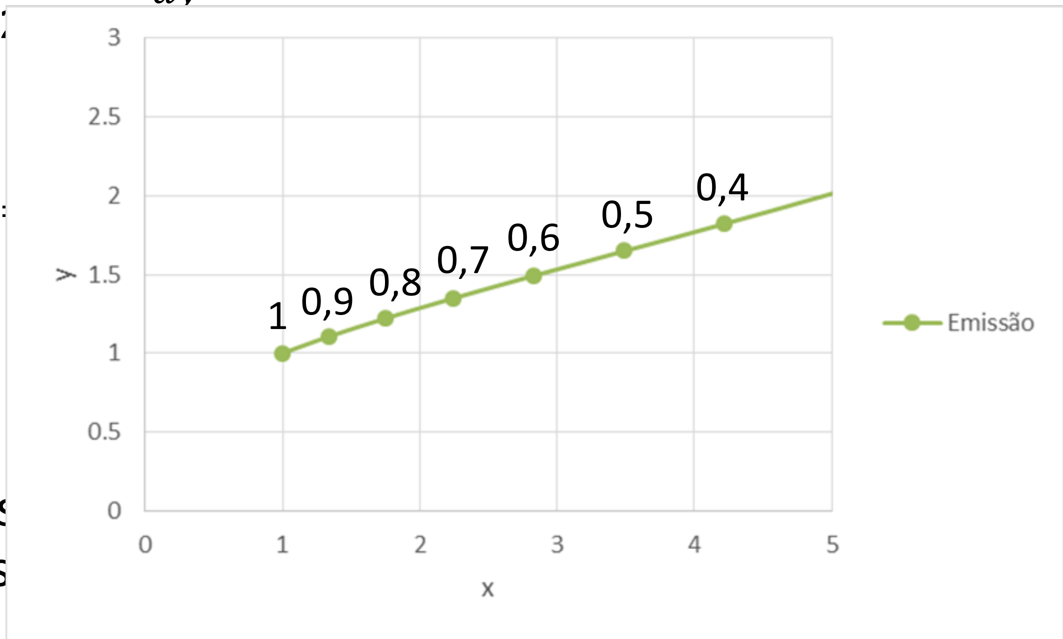
A linha de emissão das partículas que passam pelo ponto (1,1) em um intervalo de tempo entre 0 e 1s é obtida fazendo t = 1s e variando t_0.

$$x = e^{2-t_0(1+t_0)} \quad ; \quad y = e^{1-t_0} \longrightarrow \boxed{x = y^{3-\ln y}}$$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente

$$\vec{V} = x(1+2t)\hat{\imath} + y\hat{\jmath}$$

c) $u = \dfrac{dx}{dt}$; $v = \dfrac{dy}{dt}$ $\longrightarrow$ $\dfrac{dx}{dt} = x(1+$ dy



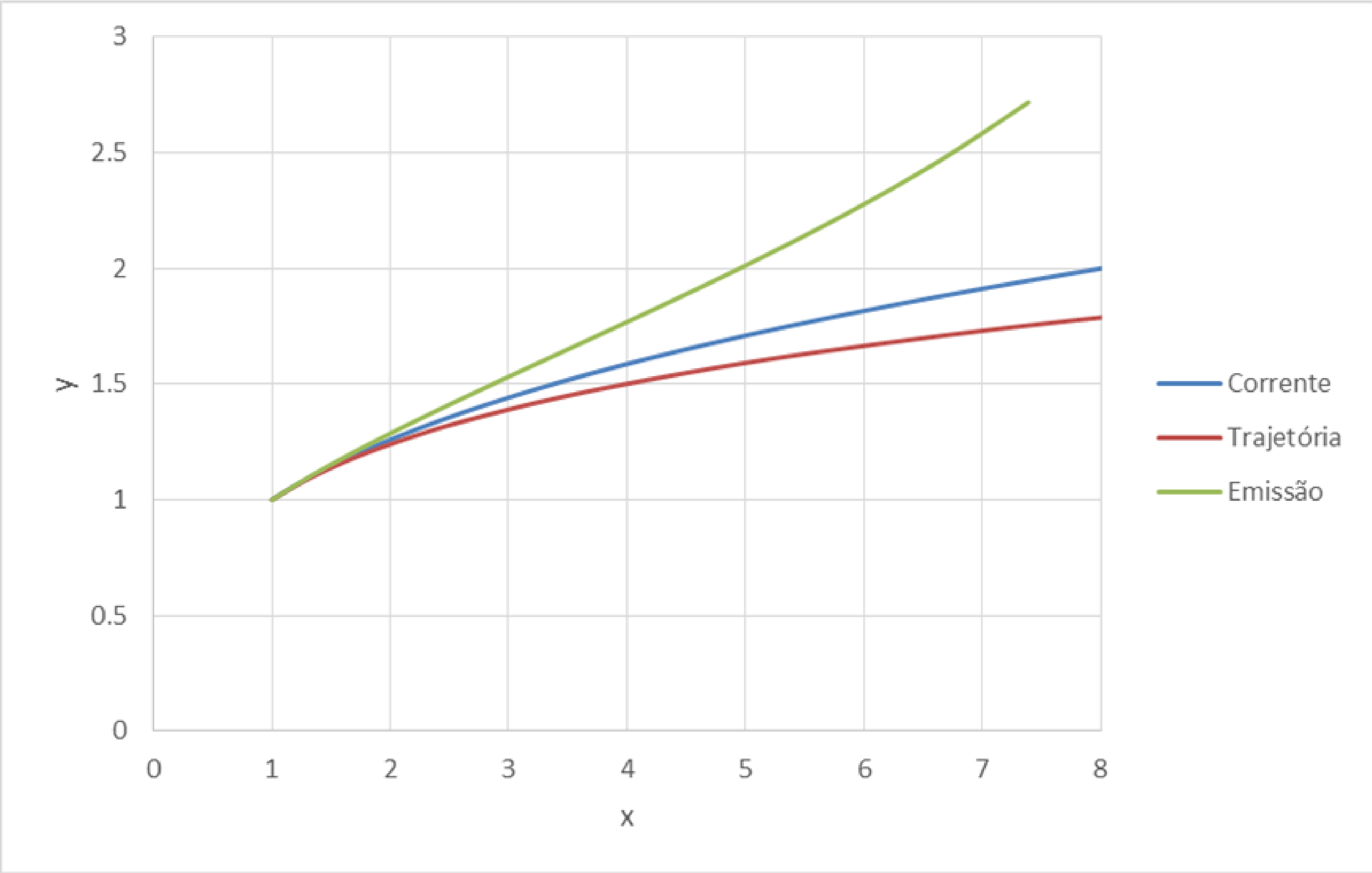
Separando variáveis e integrando, $\displaystyle\int_1^x \frac{dx}{x}$

$$x = e^{t(1+t)-t_0(1+t_0)} \quad ; \quad y = e^{t-t_0}$$

A linha de emissão das partículas que pass
tempo entre 0 e 1s é obtida fazendo t = 1s

$$x = e^{2-t_0(1+t_0)} \quad ; \quad y = e^{1-t_0} \longrightarrow \boxed{x = y^{3-\ln y}}$$

Linhas de tempo, trajetória, emissão e corrente



Campo de tensão

Nos estudos de mecânica dos fluidos, é muito importante conhecer as forças que atuam nas partículas fluidas.

Existem dois tipos de força:

- Forças de superfície: geradas pelo contato ou interação entre partículas ou com superfícies sólidas (pressão, atrito);
- Forças de corpo: atuam através de toda a partícula (gravidade, eletromagnética).

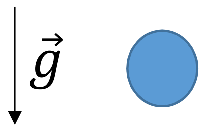
Campo de tensão

Nos estudos de mecânica dos fluidos, é muito importante conhecer as forças que atuam nas partículas fluidas.

Existem dois tipos de força:

- <u>Forças de superfície</u>: geradas pelo contato ou interação entre partículas ou com superfícies sólidas (pressão, atrito);
- <u>Forças de corpo</u>: atuam através de toda a partícula (gravidade, eletromagnética).

Partícula:



Massa específica ρ
Volume $d\forall$

$$d\vec{F}_B = \rho \vec{g} d\forall$$

Campo de tensão

As forças de superfície geram **tensões**.

O conceito de tensão é útil para descrever como as forças atuantes nas fronteiras de um meio são transmitidas através do mesmo.

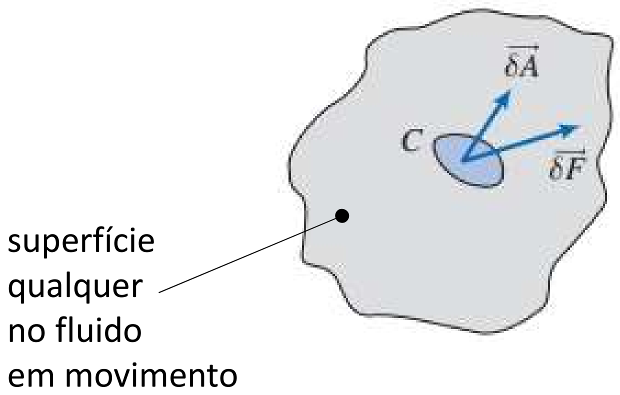
Para descrevermos o campo de tensão que atua sobre uma partícula fluida, imaginemos o seguinte:

Campo de tensão

As forças de superfície geram **tensões**.

O conceito de tensão é útil para descrever como as forças atuantes nas fronteiras de um meio são transmitidas através do mesmo.

Para descrevermos o campo de tensão que atua sobre uma partícula fluida, imaginemos o seguinte:



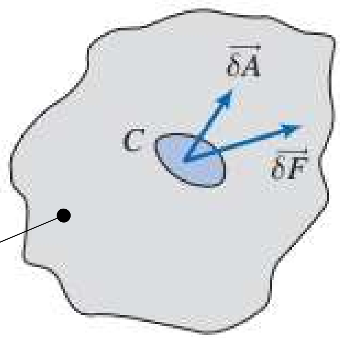
Campo de tensão

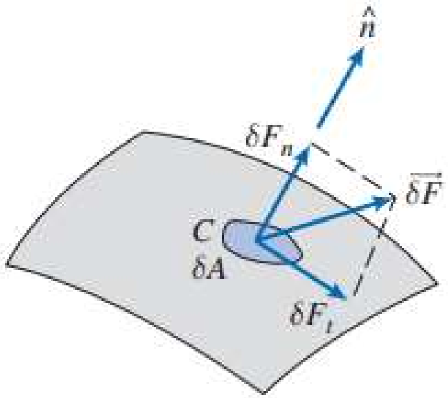
As forças de superfície geram **tensões**.

O conceito de tensão é útil para descrever como as forças atuantes nas fronteiras de um meio são transmitidas através do mesmo.

Para descrevermos o campo de tensão que atua sobre uma partícula fluida, imaginemos o seguinte:

superfície
qualquer
no fluido
em movimento





Tensão normal

$$\sigma = \lim_{\delta A \to 0} \frac{\delta F_n}{\delta A}$$

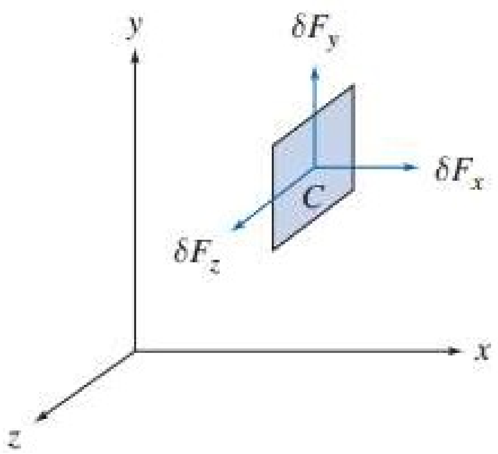
Tensão cisalhante

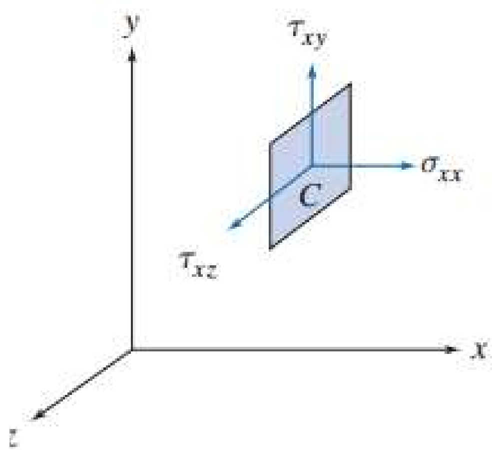
$$\tau = \lim_{\delta A \to 0} \frac{\delta F_t}{\delta A}$$

Campo de tensão

Em um sistema de coordenadas cartesianas:

A força δF é decomposta em suas 3 componentes, originando 3 componentes de tensão atuantes no plano x.





$$\sigma_{xx} = \lim_{\delta A_x \to 0} \frac{\delta F_x}{\delta A_x}$$

$$\tau_{xy} = \lim_{\delta A_x \to 0} \frac{\delta F_y}{\delta A_x}$$

$$\tau_{xz} = \lim_{\delta A_x \to 0} \frac{\delta F_z}{\delta A_x}$$

CONVENÇÃO

1° índice: plano

2° índice: direção força

Campo de tensão

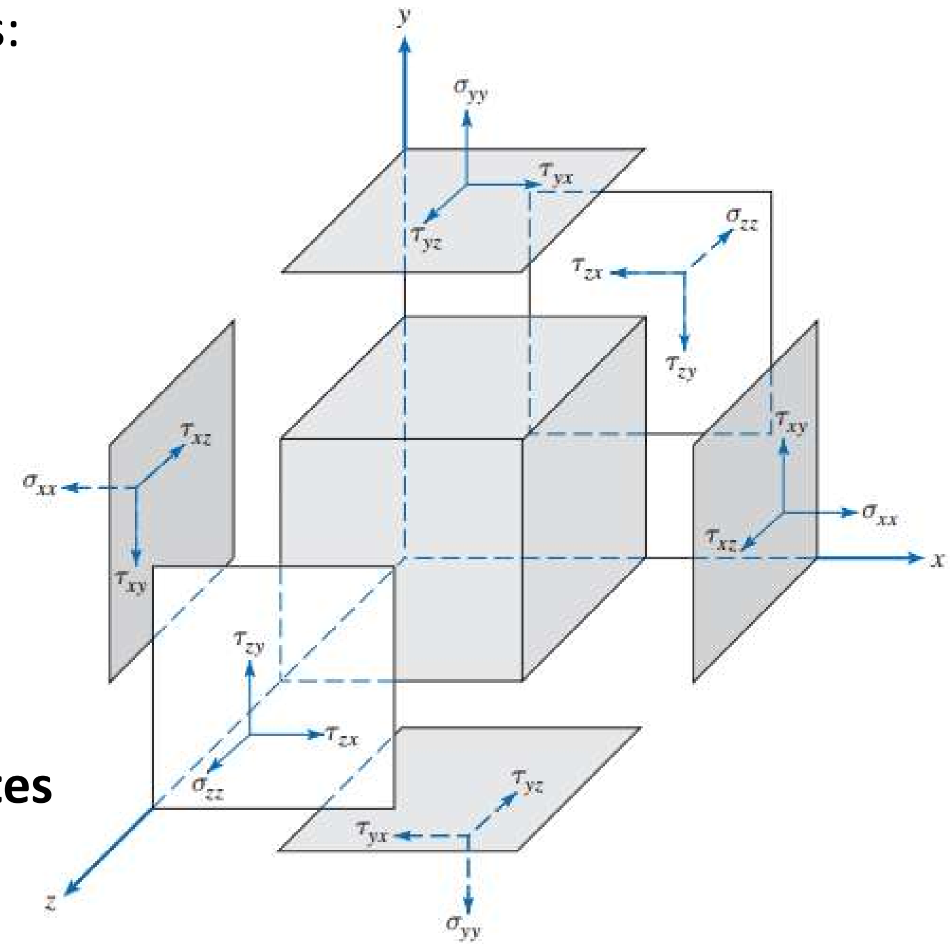
O estado de tensão em coordenadas cartesianas:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Convenção:

Tensão +: sentidos do plano e da tensão **iguais**

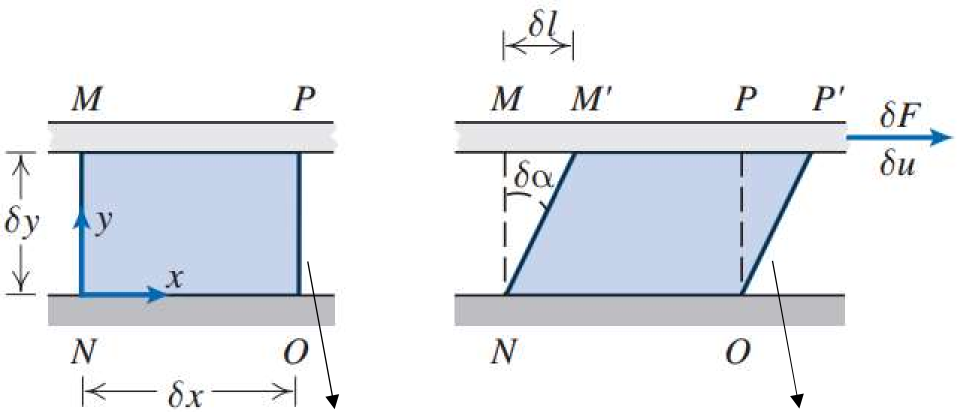
Tensão -: sentidos do plano e da tensão **diferentes**



Viscosidade

Definimos o fluido como uma substância que se deforma continuamente sob ação de uma tensão de cisalhamento.

Considere a figura abaixo:



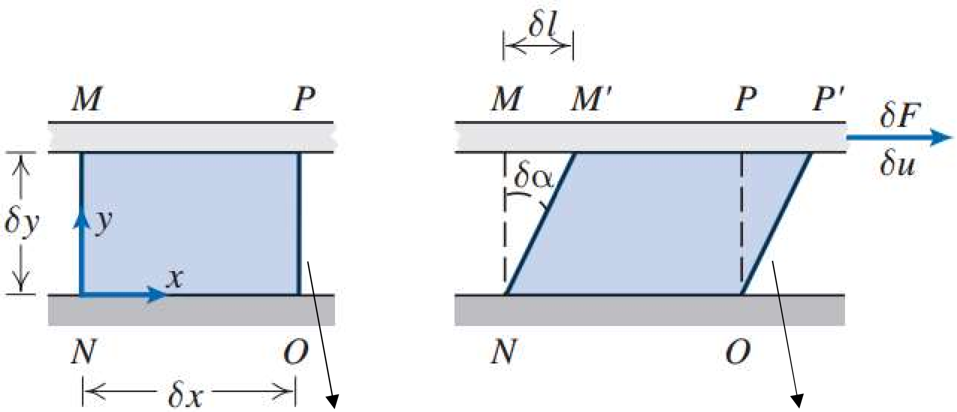
Seção fluida no tempo t

Seção fluida no tempo $t + \delta t$

Viscosidade

Definimos o fluido como uma substância que se deforma continuamente sob ação de uma tensão de cisalhamento.

Considere a figura abaixo:



Seção fluida no tempo t

Seção fluida no tempo $t + \delta t$

Ao aplicar a força δF e mover a placa superior com velocidade δu durante um intervalo de tempo δt, o elemento fluido se deforma de MNOP para M'NOP'.

Isso significa uma deformação do elemento em $\delta \alpha$, tal que:

$$\delta l = \delta y \delta \alpha$$

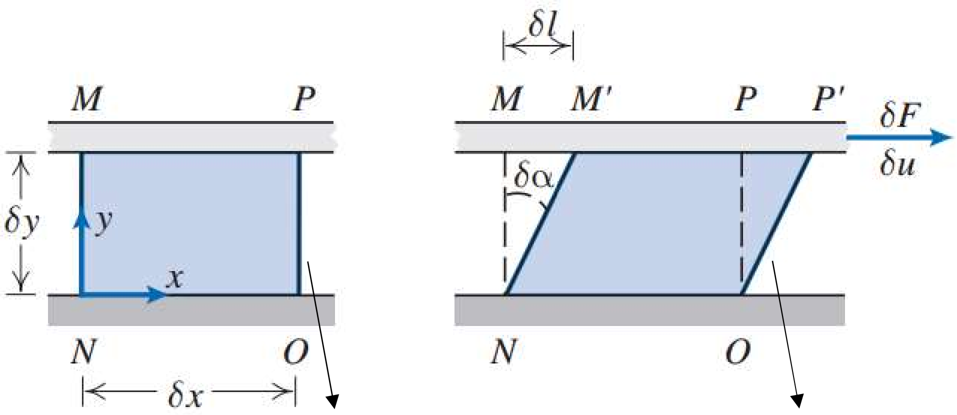
Por outro lado,

$$\delta l = \delta u \delta t$$

Viscosidade

Definimos o fluido como uma substância que se deforma continuamente sob ação de uma tensão de cisalhamento.

Considere a figura abaixo:



Seção fluida no tempo t

Seção fluida no tempo $t + \delta t$

$$\delta y \delta \alpha = \delta u \delta t \longrightarrow \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y}$$

Tomando os limites dos dois lados, com δt e δy tendendo a zero, temos:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy}$$ taxa de deformação

Isto é, a força aplicada na placa superior provoca uma tensão que é "propagada para o interior do fluido", produzindo uma variação da velocidade com y.

Para fluidos newtonianos: $\tau_{yx} \propto \frac{du}{dy}$

Viscosidade

A constante de proporcionalidade entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação é a viscosidade absoluta (μ):

$$\boxed{\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}}$$

unidade de μ no SI $\left[\frac{N}{m^2}.s\right]$ $ou\ [Pa.s]$

Exemplos de fluidos newtonianos: água, ar, gasolina, óleos...

<u>Interpretação física da viscosidade:</u>

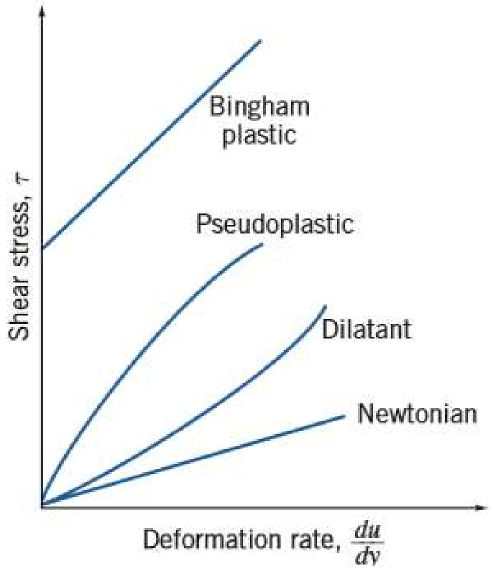
A viscosidade pode ser entendida como uma medida de resistência do fluido ao movimento (atrito no interior do fluido). Quanto $\uparrow\mu$, $\uparrow\tau_{yx}$ para uma mesma $\frac{du}{dy}$

A viscosidade cinemática é dada por $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Viscosidade

Fluidos não-newtonianos:

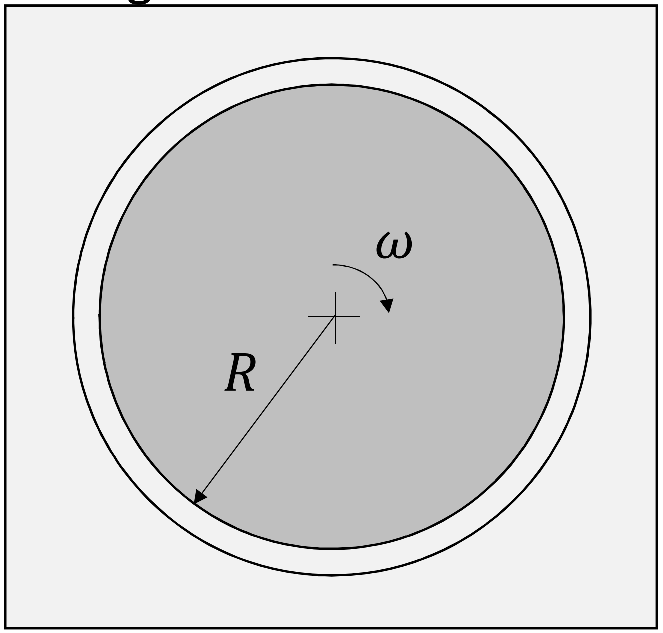
Fluidos em que a tensão de cisalhamento não é diretamente proporcional à taxa de deformação. Isso significa que a viscosidade varia com a taxa de deformação.



Exemplos: pasta de dente, areia da praia, suspensões coloidais, tintas...

Viscosidade

Ex: Qual é a potência consumida por um eixo de raio R e comprimento L que gira a uma velocidade ω? O fluido na folga tem viscosidade μ e a folga é δ.

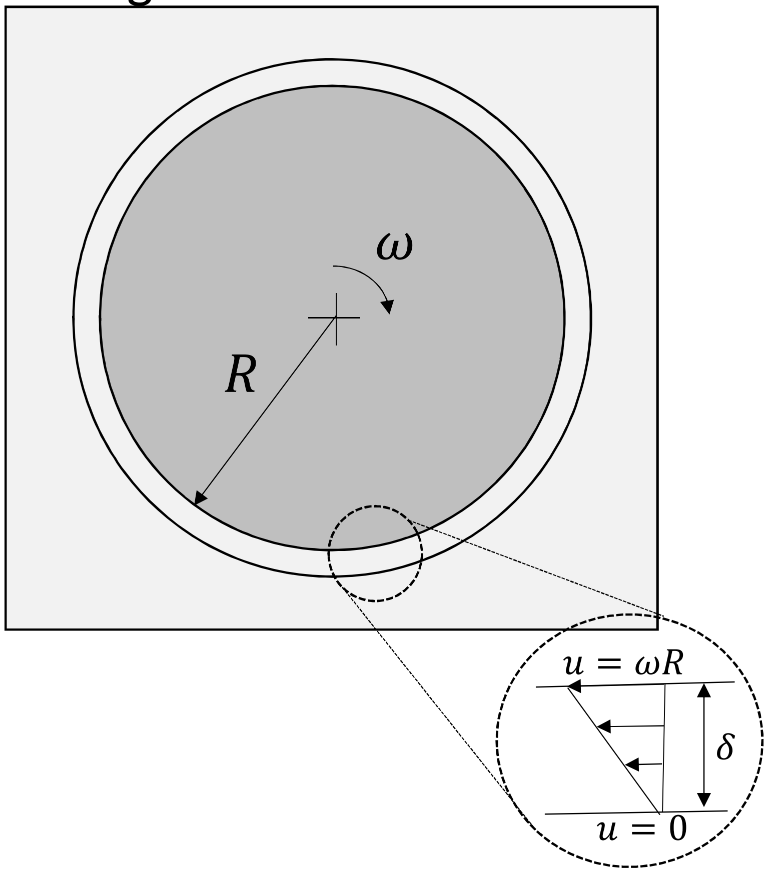


Viscosidade

Ex: Qual é a potência consumida por um eixo de raio R e comprimento L que gira a uma velocidade ω? O fluido na folga tem viscosidade μ e a folga é δ.

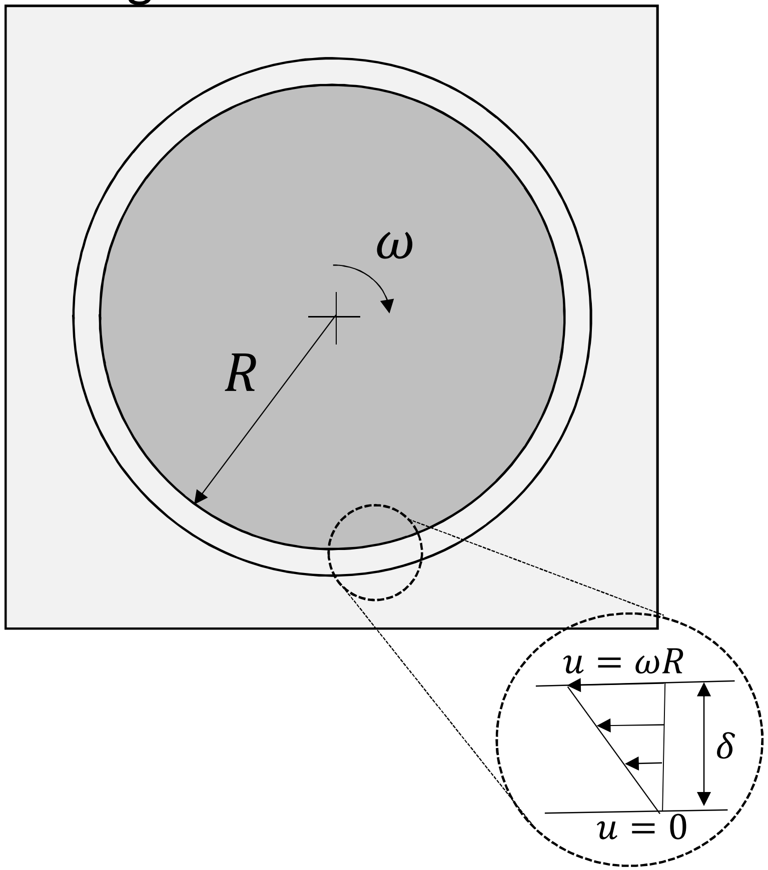
Hipóteses:

1) Fluido newtoniano
2) Taxa de deformação linear: $\dfrac{du}{dy} = \dfrac{\Delta u}{\Delta y}$



Viscosidade

Ex: Qual é a potência consumida por um eixo de raio R e comprimento L que gira a uma velocidade ω? O fluido na folga tem viscosidade μ e a folga é δ.



Hipóteses:

1) Fluido newtoniano
2) Taxa de deformação linear: $\dfrac{du}{dy} = \dfrac{\Delta u}{\Delta y}$

Solução:

$$P = T\omega = FR\omega = \tau AR\omega \qquad A = 2\pi RL$$

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} = \mu \frac{\omega R}{\delta}$$

$$\boxed{P = 2\pi\mu\omega^2 \frac{LR^3}{\delta}}$$

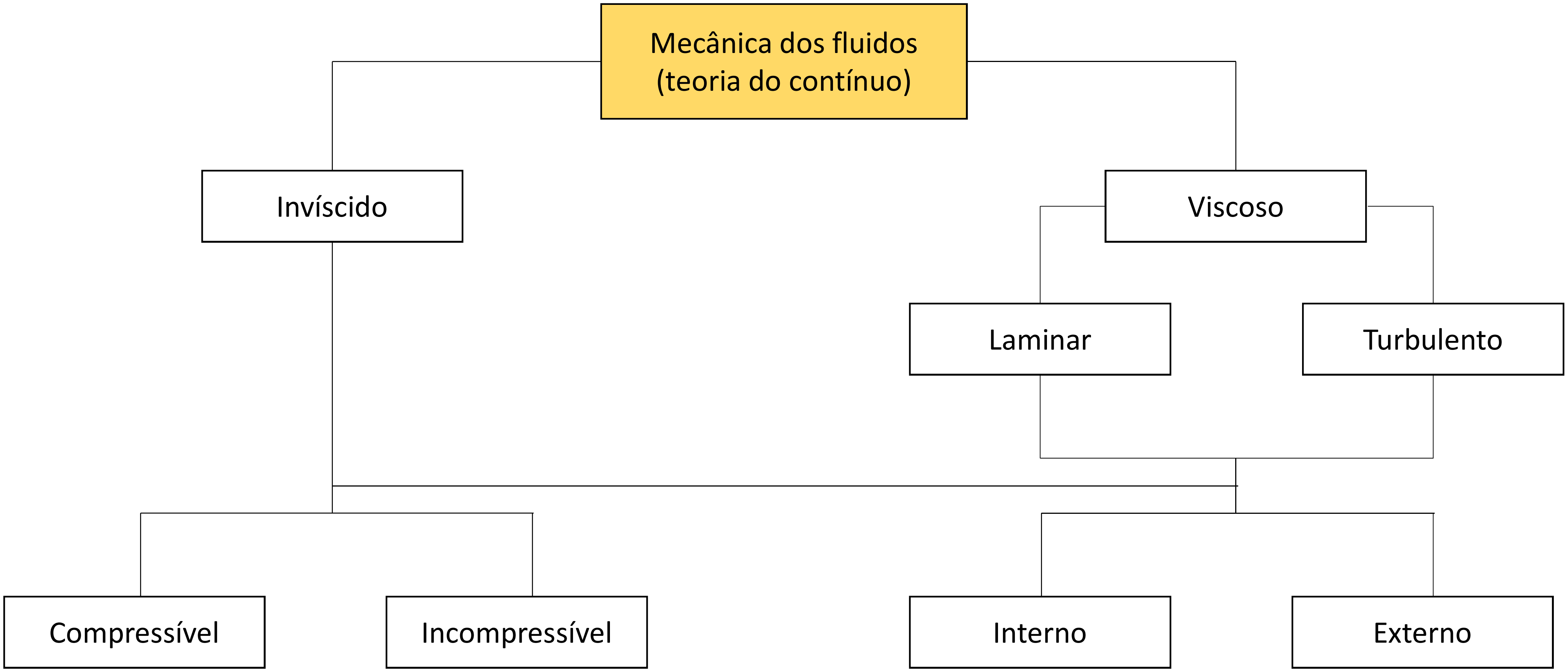
Viscosidade

Exercício 2.30 (Fox, 6ª ed): A distribuição de velocidade para o escoamento laminar desenvolvido entre placas paralelas é dada por:

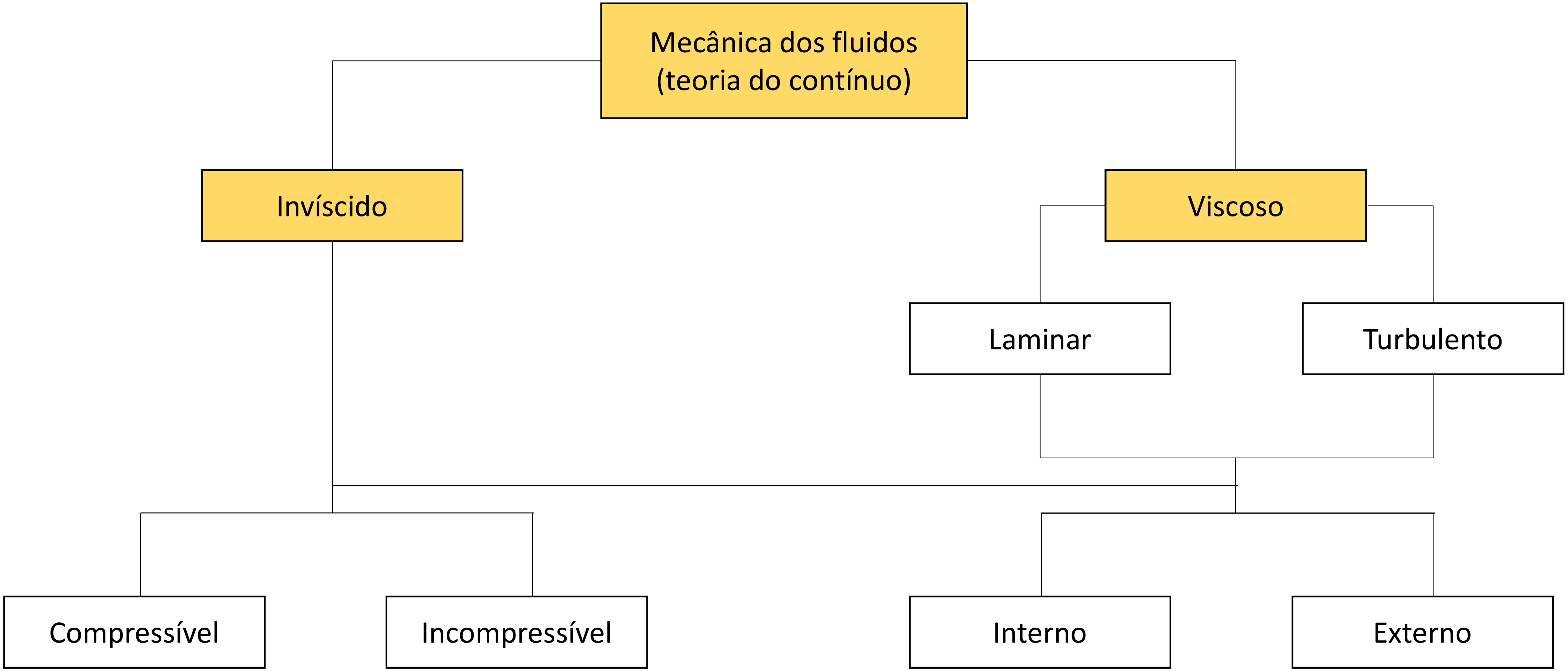
$$\frac{u}{u_{max}} = 1 - \left(\frac{2y}{h}\right)^2$$

onde h é a distância entre as placas; a origem é colocada na linha mediana entre as placas. Considere um escoamento de água a 15°C ($\mu = 1{,}14 \cdot 10^{-3}$ Pa.s), com u_{max} = 0,05 m/s e h = 1 mm. Calcule a força cisalhante sobre uma seção de 1 m² da placa inferior e forneça o seu sentido.

Descrição e classificação do movimento dos fluidos



Descrição e classificação do movimento dos fluidos



Escoamento invíscido e viscoso

Escoamento invíscido:

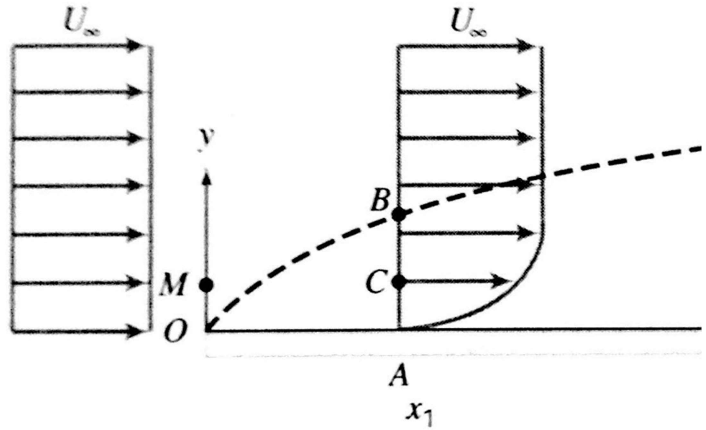
- As forças viscosas são desprezadas (não há taxa de deformação no escoamento);
- Na prática, é como se $\mu = 0$.

Escoamento viscoso:

- A velocidade do fluido junto à superfície assume o seu valor (não-escorregamento);
- Presença de taxa de deformação e tensões cisalhantes.

Escoamentos invíscido e viscoso

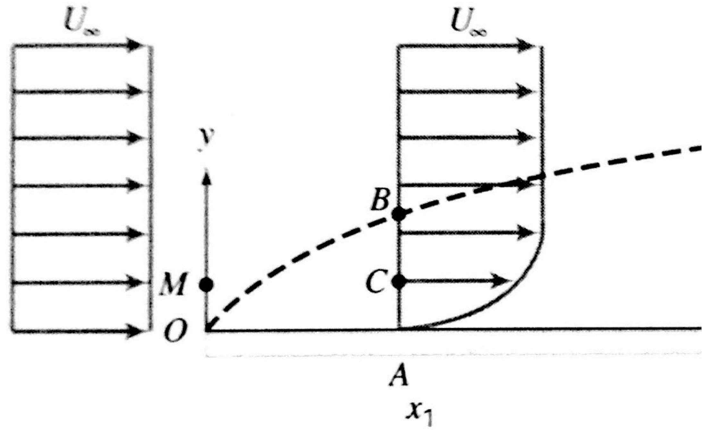
Considere a figura:



- Não-deslizamento: Em A, $u = 0$;
- À medida que y aumenta, o efeito da presença da placa sobre o escoamento é menor, até se tornar praticamente nulo (B);
- Em C, $0 \leq u \leq U_\infty$;

Escoamentos invíscido e viscoso

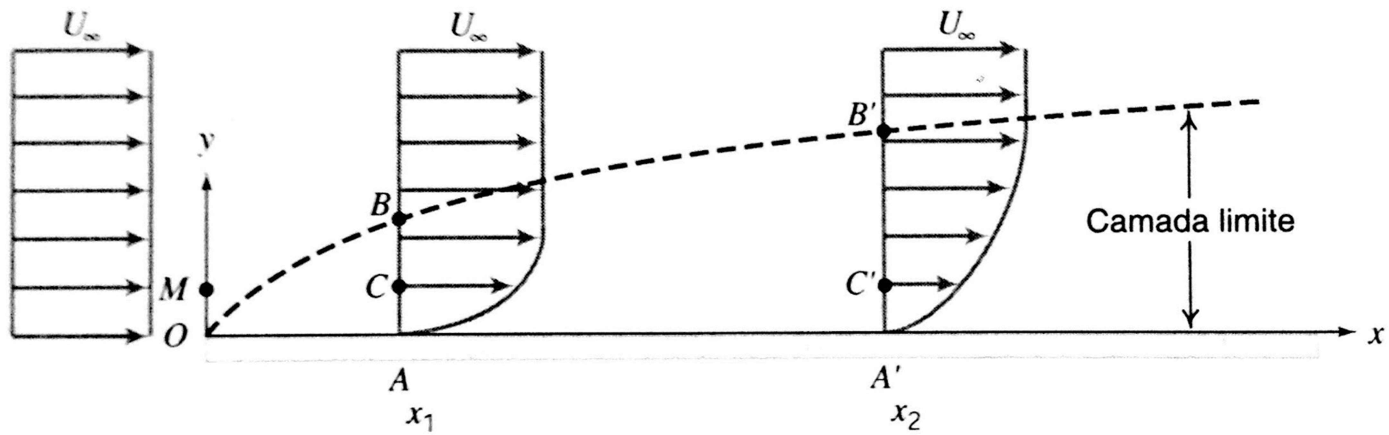
Considere a figura:



- A tensão τ_{yx} no ponto C é positiva. Se escolhermos um plano y -, o sentido da tensão será x-, retardando a camada superior do escoamento;

Escoamentos invíscido e viscoso

Considere a figura:



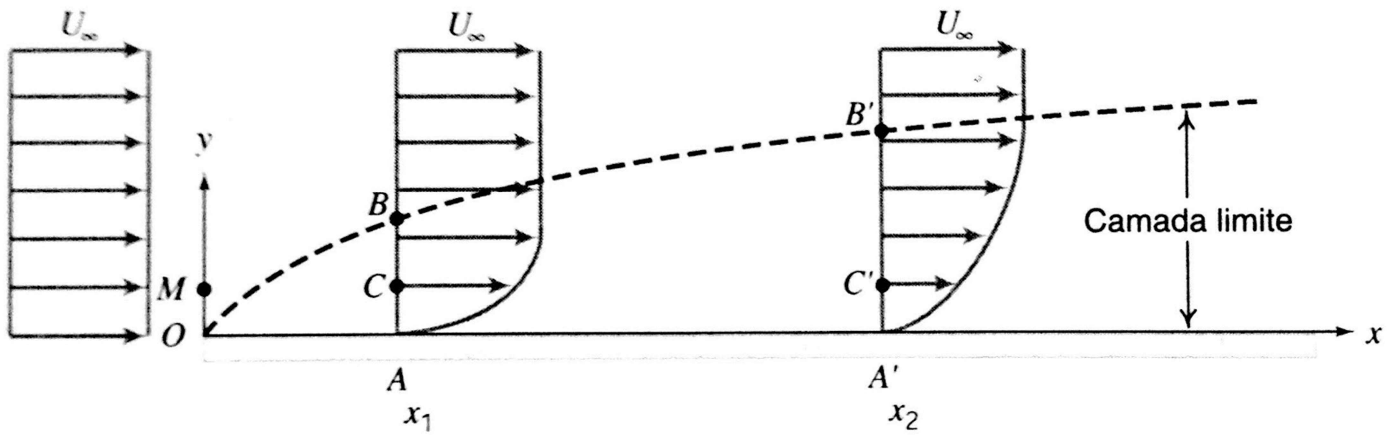
- A tensão τ_{yx} no ponto C é positiva. Se escolhermos um plano y -, o sentido da tensão será x-, retardando a camada superior do escoamento;

- Na seção x$_2$, $u = 0$ em A'.

- É razoável esperar que $\mathrm{y(B')} > \mathrm{y(B)}$ e que $u_{C'} < u_C$

Escoamentos invíscido e viscoso

Considere a figura:



- A tensão τ_{yx} no ponto C é positiva. Se escolhermos um plano y -, o sentido da tensão será x-, retardando a camada superior do escoamento;

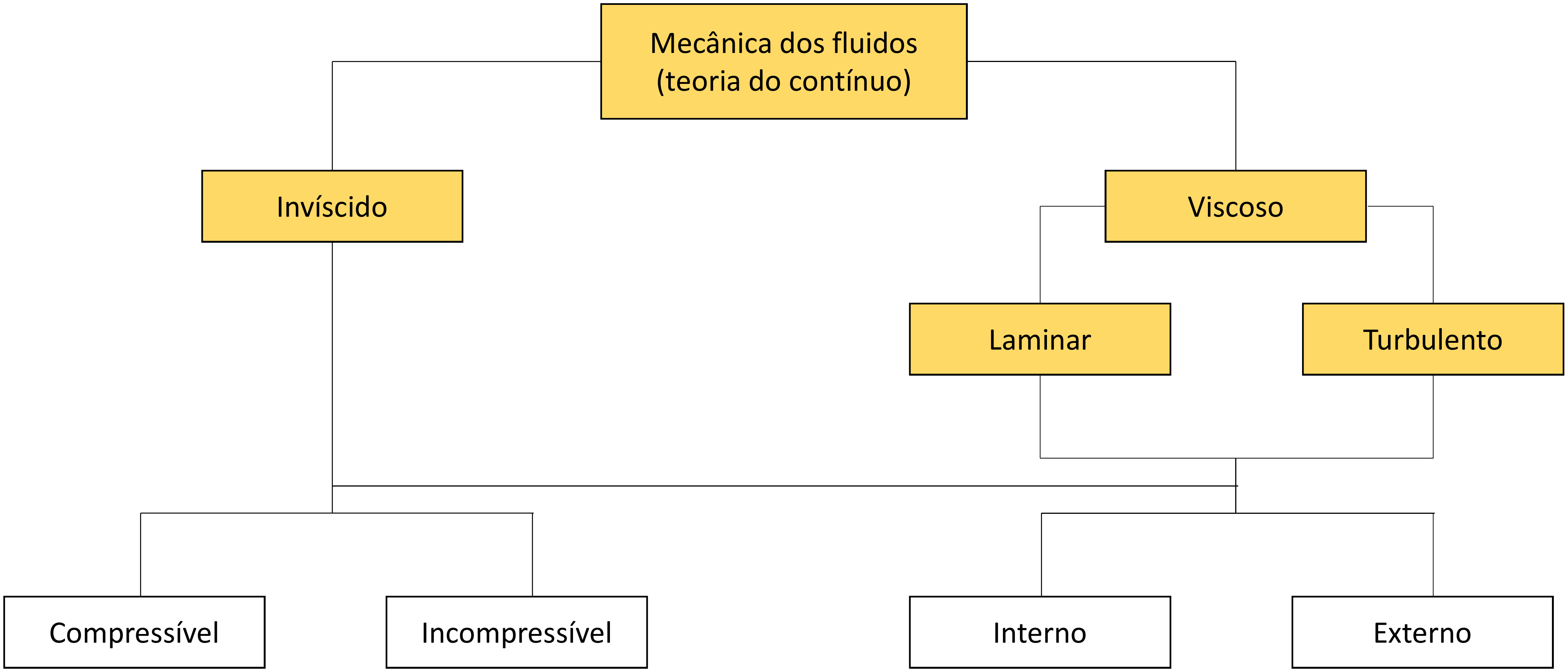
- Na seção x_2, $u = 0$ em A'.

- É razoável esperar que $\mathrm{y(B')} > \mathrm{y(B)}$ e que $u_{C'} < u_C$

Duas regiões bem definidas:

1. Fora da camada limite - **invíscido**
2. Dentro da camada limite - **viscoso**

Descrição e classificação do movimento dos fluidos

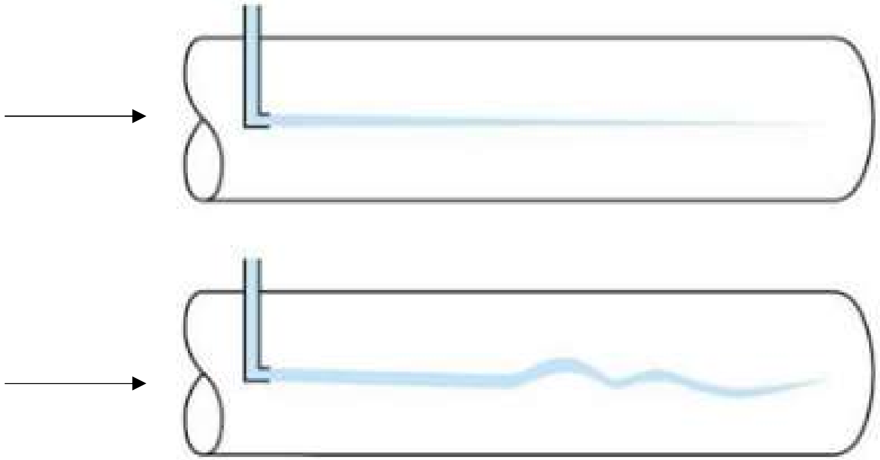


Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:

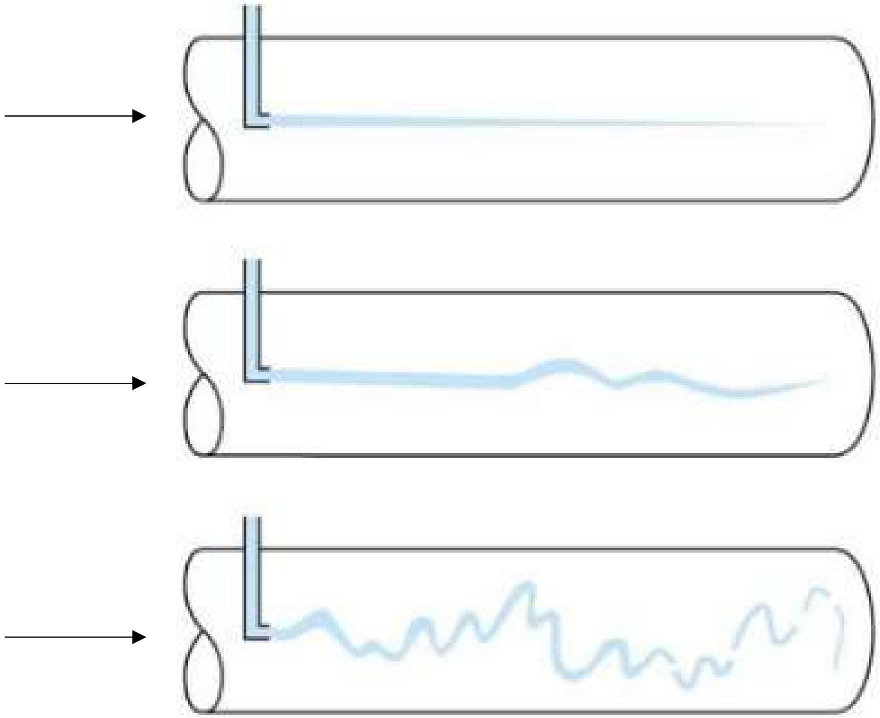
Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:



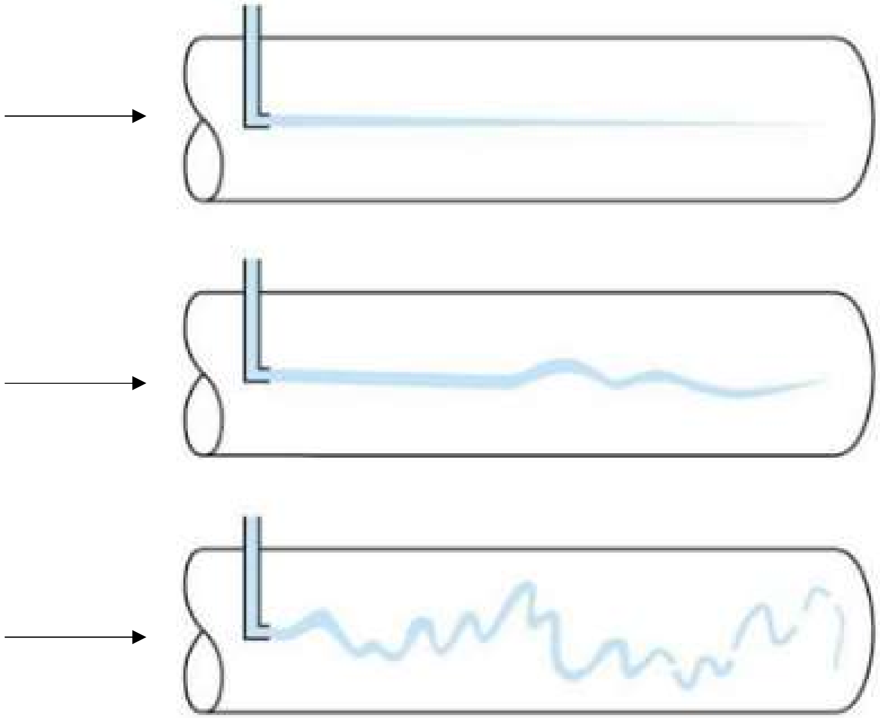
Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:



Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:

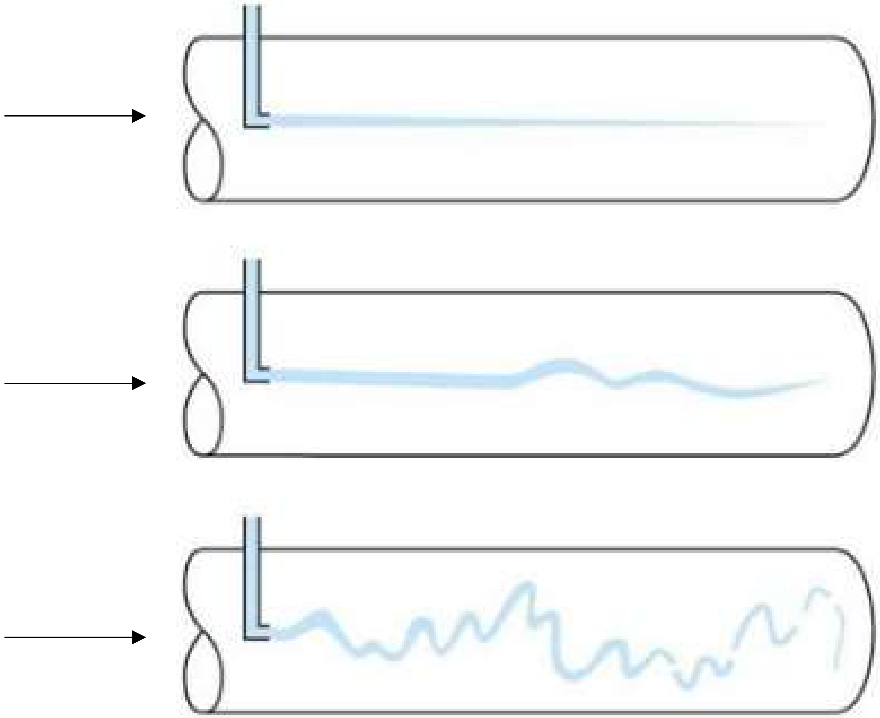


laminar

turbulento

Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:



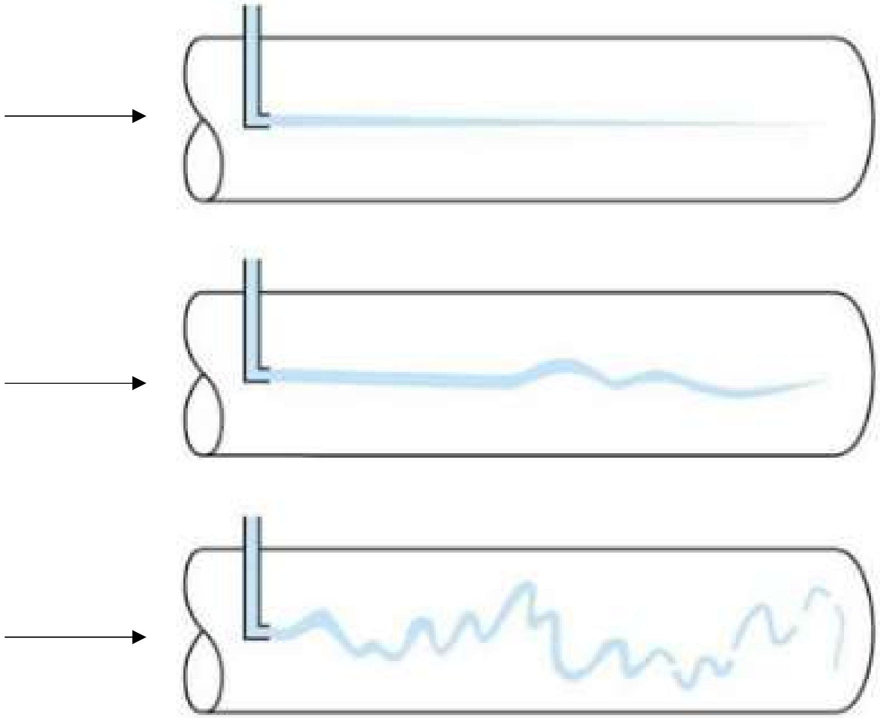
laminar

- Padrão de lâminas
- Não há mistura entre camadas
- No caso 1D: $\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$

turbulento

Escoamentos laminar e turbulento

Considere a situação:



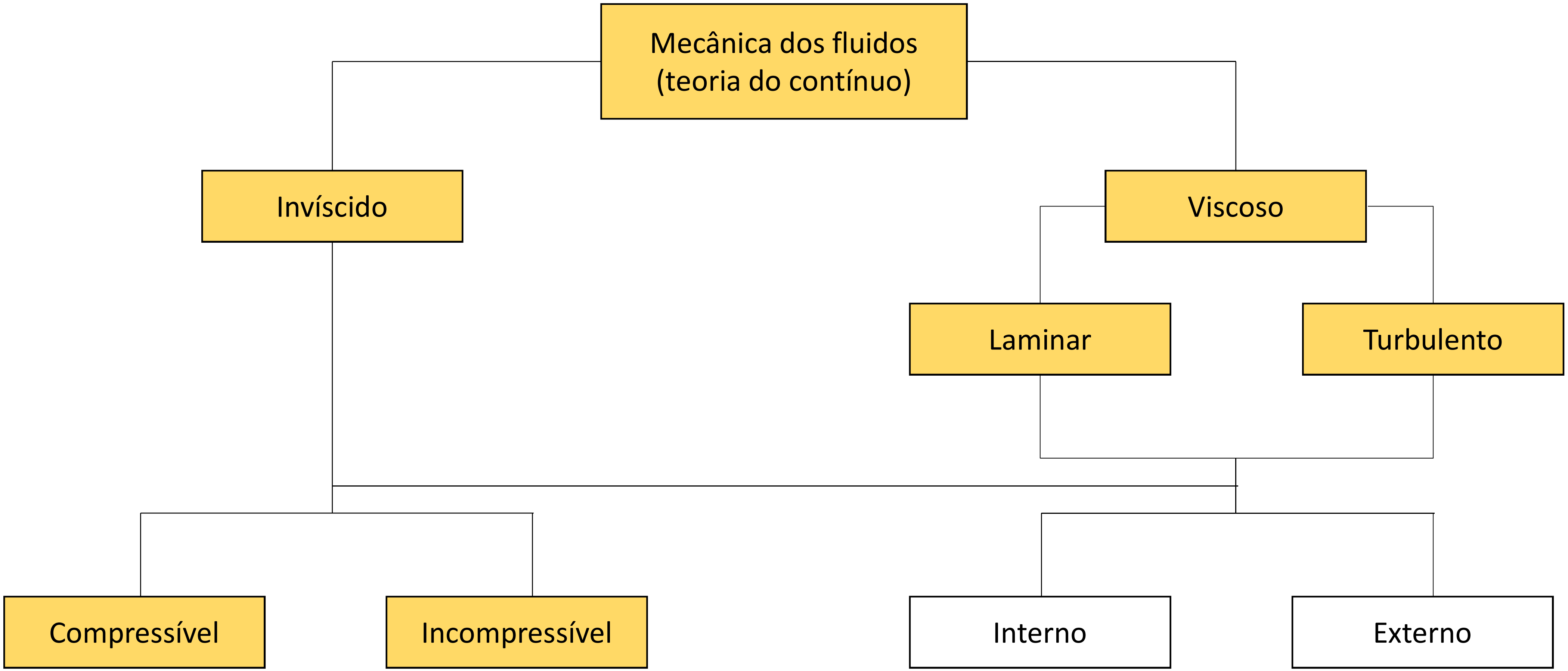
laminar

- Padrão de lâminas
- Não há mistura entre camadas
- No caso 1D: $\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy}$

turbulento

- Aleatório, 3D
- Flutuações de velocidade
- No caso 1D: $\tau_{yx} = \mu \frac{du}{dy} + \tau_t$

Descrição e classificação do movimento dos fluidos



Escoamentos incompressível e compressível

<u>Incompressível</u>:

- Variação da massa específica é desprezível;

- Geralmente, os líquidos são incompressíveis.

incompressível

Escoamentos incompressível e compressível

<u>Incompressível</u>:

- Variação da massa específica é desprezível;
- Geralmente, os líquidos são incompressíveis.

incompressível

compressível

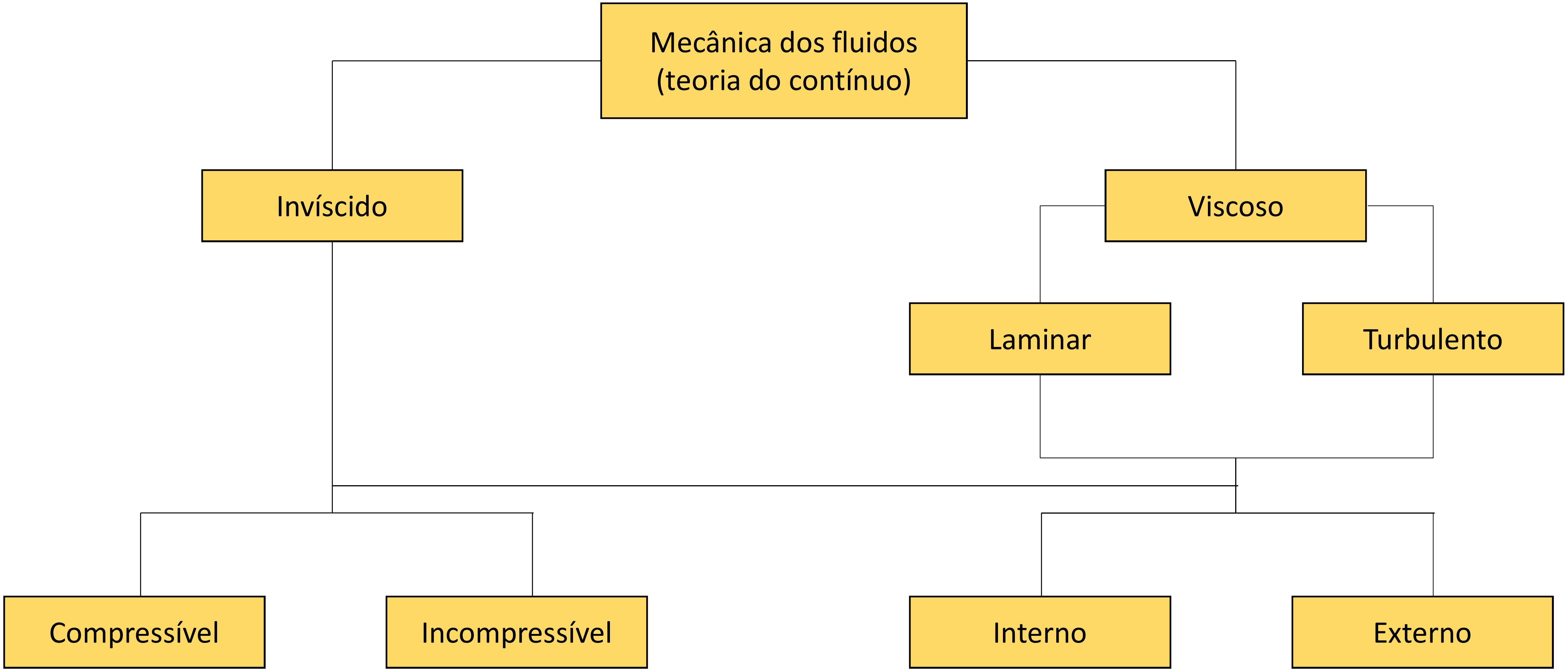
<u>Compressível</u>:

- Variação da massa específica não é desprezível
- Gases

$$Ma = \frac{V}{c} < 0,3$$ incompressível

$$Ma = \frac{V}{c} > 0,3$$ compressível

Descrição e classificação do movimento dos fluidos



Escoamentos interno e externo

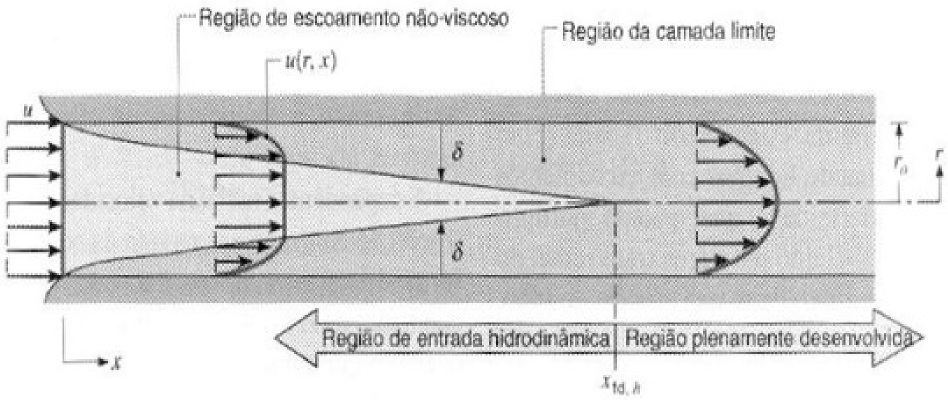
Interno:

- Escoamentos involtos por superfícies sólidas (confinados);
- Pode ser laminar ou turbulento, compressível ou incompressível;
- Escoamento interno incompressível em dutos:

$$\boxed{Re = \frac{\rho \bar{V} D}{\mu}}$$

$Re \leq 2300$ laminar

$Re > 2300$ turbulento



Escoamentos interno e externo

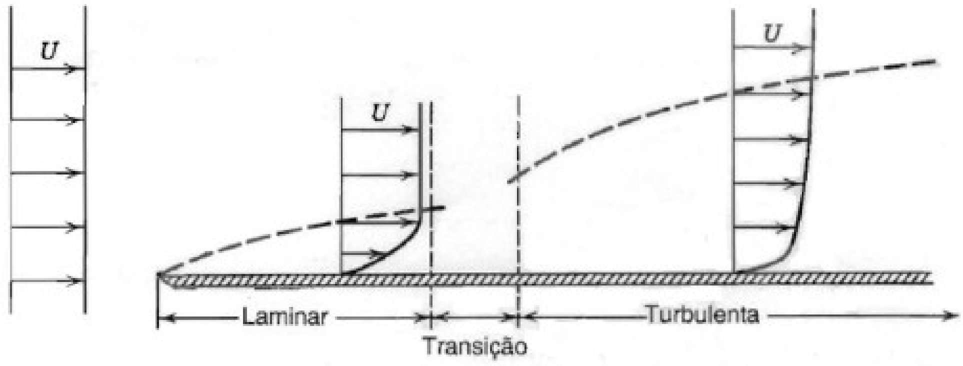
Externo:

- Escoamento sobre corpo imerso em um fluido não confinado;
- Pode ser laminar ou turbulento, compressível ou incompressível;
- Placa plana, cilindro
- Escoamento de camada limite pode ser laminar ou turbulento

$$\boxed{Re_x = \frac{\rho U_\infty x}{\mu}}$$

$Re \leq 5x10^5$ laminar

$Re > 5x10^5$ turbulento



Viscosidade

Exercício 2.45 (Fox, 5ª ed): Foi proposto empregar um par de discos paralelos de raio R para medir a viscosidade de uma amostra líquida. O disco superior gira à velocidade angular ω a uma altura h acima do disco inferior. A viscosidade do líquido na folga deve ser calculada a partir de medições do torque necessário para girar o disco superior continuamente. Obter expressões algébricas para a tensão cisalhante em qualquer posição radial e para o torque necessário para girar o disco superior.