



## MECÂNICA DE FLUIDOS

### Cap. 1

- O que é a mecânica de fluidos;
- O conceito de fluido;
- Da natureza discreta ao tratamento contínuo;
- Principais propriedades físicas dos fluidos;
- Técnicas de análise em escoamento de fluidos.

#### Bibliografia:

- Quintela, A. 2000. Hidráulica. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa;
- White, Frank. 1999. Mecânica de Fluidos. McGraw Hill;
- Bastos, F. 1983. Problemas de mecânica de fluidos. Gaunabara, Rio de Janeiro.
- Cameira, M.R. Sebenta de MecFluidos. 2013. ISA\_Ulisboa.

### ❑ O que é a Mecânica de Fluidos

É o ramo da Mecânica que estuda:

- O comportamento dos fluidos, em repouso (estática dos fluidos) e em movimento (dinâmica dos fluidos); e
- Os efeitos do fluido sobre os seus contornos, que podem ser superfícies sólidas ou contactos com outros fluidos.

Sendo a Mecânica dos Fluidos um ramo da Mecânica, ela rege-se por um conjunto de **leis fundamentais da mecânica** já estudadas na Física (1º ano).

A essência do estudo do comportamento dos fluidos é um compromisso entre **teoria** e **experimentação**, ou seja entre teorias com base física e empirismo.

A teoria aplica-se sobretudo a situações idealizadas que podem ser inválidas em problemas práticos.

Os dois principais obstáculos à validade de uma teoria são a **geometria** e a **viscosidade**.

❑ O que é um fluido

É uma substância :

- ❖ apresenta maior distância entre as suas moléculas do que um sólido;
- ❖ formada por partículas que alteram a sua posição relativa;
- ❖ que se deforma continuamente, escoando, se uma **força de corte** (ou tensão de cisalhamento) lhe for aplicada e não recupera a sua forma quando a força é retirada; Um fluido em repouso sofre uma tensão de corte nula;
- ❖ que toma a forma do recipiente que a contém.

Fluidos	Fase líquida	Pouco compressíveis
	Fase gasosa	Muito compressíveis

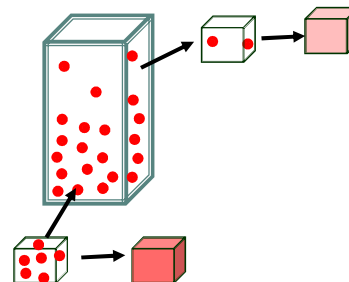
❑ Da natureza discreta ao tratamento contínuo

**hipótese do continuum** - Simplificação segundo a qual os fluidos são tratados como **meios contínuos**, isto é, distribuições contínuas de matéria sem espaços vazios, em vez de conjuntos de moléculas separadas por espaços vazios (tratamento discreto);

Em vez de trabalharmos com **moléculas de fluido** (nível microscópico) trabalhamos com **porções ou volumes elementares de fluido** (nível macroscópico).

O **volume elementar** tem como características:

- ser suficientemente pequeno (quando comparado com toda a região de fluido em estudo) para que todas as propriedades possam ser consideradas uniformemente e
- ser consideravelmente maior do que a distância entre moléculas, para que não haja descontinuidade da matéria.



Podemos assim considerar que as grandezas em estudo variam continuamente de ponto para ponto do fluido, caso não sejam constantes.

Recorre-se, sob a hipótese do contínuum a **grandezas macroscópicas**, tais como: *velocidade do escoamento, densidade, pressão e temperatura.*

Estas grandezas podem ser facilmente medidas e relacionam-se mais com os conhecimentos comuns do escoamento do que as grandezas microscópicas (ao nível molecular).

□ Algumas propriedades físicas dos fluidos com interesse em engenharia:

➤ Propriedades **termodinâmicas** (descrevem o estado de um sistema) e suas derivadas

As três **mais comuns** são: {  
 1. **Pressão**,  
 2. **Massa específica**,  
 3. **Temperatura**;

Outras, derivadas das anteriores, importantes quando pretendemos realizar **balanços** de trabalho, calor e energia são: {  
 1. Energia interna,  
 2. Entalpia,  
 3. Entropia,  
 4. Calor específico;

Por fim, as propriedades de **transporte** (difusivo) mais importantes são: {  
 1. Permeabilidade à difusão,  
 2. Condutibilidade térmica.

Massa específica, volúmica ou densidade

$\rho$  = massa por unidade de volume =  $m / V$

*Dimensões  $[\rho] = M L^{-3}$*

*Unidades SI =  $kg m^{-3}$*

Grandezas relacionadas:

Densidade relativa  $d_R$

=  $\rho$  substância /  $\rho$  água

*Dimensões  $[d] = 1$*

*Unidades SI: adimensional*

Peso volúmico  $\gamma$

= peso por unidade de volume =  $P / V$

*Dimensões  $[\gamma] = L^{-2} M T^{-2}$*

*Unidades SI =  $N m^{-3}$*

a saber



$\rho_{\text{água}} = 1000 \text{ kg m}^{-3}; \quad \gamma_{\text{água}} = 9800 \text{ N m}^{-3}; \quad d_{R \text{ água}} = 1$

[À pressão atmosférica normal de  $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  e à  $T$  de  $277 \text{ °K}$  ( $4 \text{ °C}$ )]

*Secção Eng.º Rural*

Pressão  $P$

- É a força exercida por unidade de área;
- Num fluido define-se a pressão estática e a dinâmica;
- Em conjunto com a **velocidade**, a **pressão** é a variável mais importante em mecânica de fluidos;
- São as diferenças ou gradientes de pressão que frequentemente definem o sentido dos fluxos de um fluido.

*Dimensões  $[P] = M L^{-1} T^{-2}$*

*Unidades SI =  $N m^{-2} = Pa$*

*(Pascal)*



Para escoamentos com **velocidades baixas**, o valor absoluto da pressão nem sempre é importante pois mantém-se dentro de valores que não influenciam o estado do fluido.

Para **velocidades elevadas**, existe uma propriedade do fluido que determina um **valor limite para a pressão**, abaixo do qual este muda de fase.

*Secção Eng.º Rural*

### Temperatura T

É a medida do nível de energia interna de um fluido, associada ao movimento aleatório das suas moléculas.

*Dimensões [T] =  $\theta$*

*Unidade SI = Kelvin (K)*

### Pressão (ou tensão) de saturação ou de vapor, $p_v$

- Para uma dada temperatura, a **pressão de saturação** é a pressão à qual um líquido passa ao estado gasoso;
- Quando a pressão de um líquido desce até ao valor da sua pressão de saturação ele muda para a fase gasosa - evapora;
  - ✘ Se a quebra de pressão for devida a um aumento de temperatura dizemos que o líquido **ferve**;
  - ✘ Se a quebra de pressão for devida a um aumento de velocidade do fluido, ou a um deficiente traçado do seu percurso, chamamos ao fenómeno **cavitação**.

➤ Devido a este fenómeno, o ar que se desprende do líquido, forma bolsas que reduzem a secção disponível para o escoamento de água dentro de uma tubagem;

### Cavitação

➤ Por outro lado o desprendimento do ar provoca um ataque mecânico aos órgãos metálicos da zona, com rápida deterioração destes, e a diminuição do rendimento, se se tratar de uma máquina hidráulica.



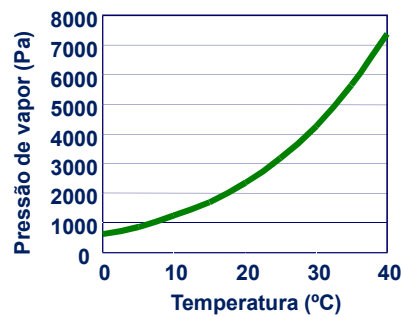
Secção Eng.ª Rural

- A pressão de vapor de água varia com a temperatura

A 100 °C a pressão de vapor é de  $1.013 \times 10^5$  Pa



Ao nível médio das águas do mar a água pura ferve a 100 °C



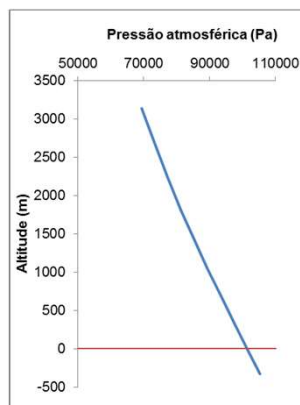
$$p_{v(T)} = 610.8 \exp\left(\frac{17.27 \times T}{237.3 + T}\right)$$

Pressão absoluta em Pa

Secção Eng.ª Rural

- A pressão de vapor de água varia com a altitude

altitude (m)	Patm (Pa)
-325	105360
0	101340
340	97320
690	93390
1045	89370
1420	85350
1820	81320
2240	77300
2680	73380
3140	69360



### Energias potencial (Ep) e cinética (Ec)

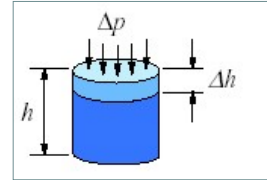
Para além da energia interna, devida à actividade molecular, em mecânica de fluidos acrescentam-se geralmente dois termos à energia do fluido: a energia potencial e a energia cinética.

Enquanto que a energia interna é função da temperatura e da pressão, as energias potências e cinética são propriedades cinemáticas, ou seja, função de?

da velocidade e da posição do fluido durante o escoamento

### Compressibilidade, k

Aumentos ou decréscimos nas pressões (forças por unidade de área) aplicadas aos fluidos provocam contracção ou expansão do fluido podendo originar **variação de  $\rho$  (massa específica ou volúmica)**



$$\Delta p = -\beta \frac{\Delta V}{V} \quad \Delta p = \beta \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \beta - \text{módulo de elasticidade volumétrica}$$

- ✘ Se a  $\rho$  do fluido se mantiver constante em todos os pontos do fluido => **fluido incompressível**
- ✘ Se a  $\rho$  do fluido não se mantiver constante em todos os pontos do fluido => **fluido compressível**

No ultimo caso é necessária uma equação de estado que relacione  $\rho$  com T e p

### 2. O que é um fluido? Propriedades físicas

No caso da água, 1 MPa de variação de pressão provoca uma variação de 0.05% no volume => **água é relativamente incompressível**



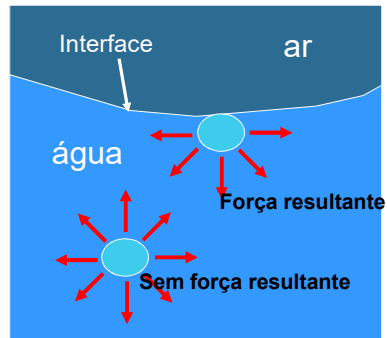
Nos líquidos em geral, a compressibilidade e o seu efeito na variação de massa volúmica são muito pequenos sendo por isso desprezada na maior parte das situações práticas

- O **golpe de ariete** é caracterizado pela ocorrência de **variações de pressão** decorrentes de variações do escoamento causadas por alguma perturbação, voluntária ou involuntária.
- **Consequências:** A pressão atinge níveis indesejáveis, que poderão danificar as tubagens e os dispositivos nelas instalados (rotura de tubagens por sobrepressão, avarias em bombas e válvulas, colapso de tubos devido a vácuo, etc).
- **Principais causas:**
  - ✓ operações de abertura ou fecho de válvulas;
  - ✓ falhas nos dispositivos de proteção e controle;
  - ✓ paragem de turbinas e de bombas hidráulicas.



## Tensão superficial, $\sigma$

Formação de uma película sob tensão nas interfaces líquido/ar e líquido/sólido



Efeitos da tensão superficial:

- ➔ Movimento de fluidos em tubos capilares;
- ➔ Retenção da água nos poros do solo;
- ➔ Transformação de um jacto líquido em gotículas;
- ➔ Movimento de bolhas de ar no interior de líquidos.



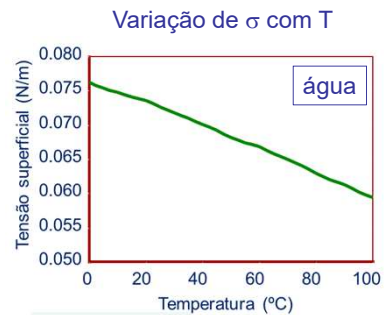
*Secção Eng. Rural*

Força associada à tensão superficial:  $F_{\sigma} = \sigma \ell$

Sendo  $\sigma$  a tensão superficial [ $\text{MT}^{-2}$ ] e  $\ell$  o comprimento de contacto entre as moléculas em diferentes fases [L].

Tensão superficial de fluidos em contacto com o ar a 20 °C

Água	0,074 N m <sup>-1</sup>
Álcool etílico	0,0223 N m <sup>-1</sup>
Mercúrio	0,51 N m <sup>-1</sup>
Óleo lubrificante	0,035 a 0,038 N m <sup>-1</sup>



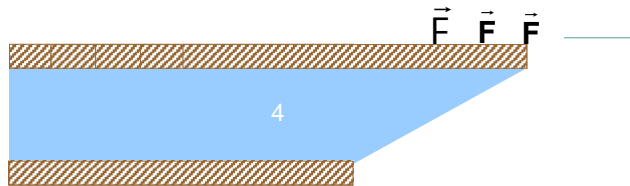
*Secção Eng. Rural*

### Viscosidade (atrito interno)

Os fluidos oferecem resistência ao escoamento, dissipando energia quando se movem.

Experiência

- ❖ Duas placas com um fluido viscoso entre elas;
- ❖ Move-se a placa de cima sob acção de uma força F;
- ❖ O fluido move-se, sendo arrastado pela placa.



A força F diz-se de corte ou cisalhamento porque é tangencial à área

A quantidade de movimento da placa superior é transmitida gradualmente às diferentes camadas do fluido.

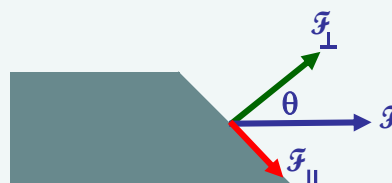
Secção Eng.º Rural

19

**Nota:**

Diferença ente os termos **Pressão** e **Tensão**

- ✓ Tensão é qualquer força a dividir pela área, independentemente da sua direcção
- ✓ Pressão é uma força a dividir pela área, só e só se a força for perpendicular à área ⇔ tensão normal



$$T_{\text{normal}} = \sigma = \frac{F_{\perp}}{A}$$

$$T_{\text{cisalhamento}} = \tau = \frac{F_{\parallel}}{A}$$

Secção Eng.º Rural

20

A **viscosidade** dinâmica de um fluido,  $\mu$  é definida como a sua **resistência à deformação**



Devido à interação entre as moléculas do fluido este tem capacidade de resistir ao movimento imposto pela força F.

Há um **gradiente de velocidades** entre as duas placas:  $\text{grad } \vec{u} = \frac{d\vec{u}}{dy}$

$$\frac{F}{A} \propto \frac{d\vec{u}}{dy} \quad \frac{F}{A} = \tau = \mu \frac{d\vec{u}}{dy} \quad \mu - \text{viscosidade dinâmica}$$

↑  
tensão de corte

$$[\mu] = L^{-1} M T^{-1} \quad \frac{N \cdot s}{m^2}$$

**Lei de Newton da viscosidade**

Secção Eng.ª Rural

21

Para **unidade prática de viscosidade dinâmica** convencionou-se **o poise, P** (e também o **centipoise, cP**) em homenagem a Poiseuille que desenvolveu os conceitos iniciais de Newton

$$1 P = 10^{-1} N \cdot s \cdot m^{-2}$$

A viscosidade dos fluidos mede-se com recurso a viscosímetros



Viscosímetro em U ou de Ostwald



Viscosímetro de rotação



Viscosímetro de Stokes

Secção Eng.ª Rural

22

Viscosidade cinemática,  $\nu$

$$\nu = \mu / \rho$$

$$[\nu] = L^2 T^{-1}$$

$$\frac{m^2}{s}$$

Variação da viscosidade da água com a temperatura

T (°C)	Visc. cinemática (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
0	1.79 x 10 <sup>-6</sup>
10	1.31 x 10 <sup>-6</sup>
20	1.0 x 10 <sup>-6</sup>
30	0.79 x 10 <sup>-6</sup>
40	0.65 x 10 <sup>-6</sup>
50	0.56 x 10 <sup>-6</sup>

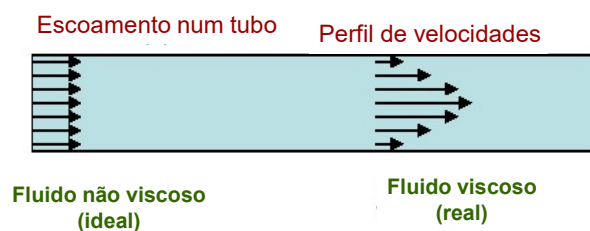
Viscosidade cinemática (m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>) de alguns líquidos a 1 atm e a 20 °C

Gasolina	4.22 x 10 <sup>-7</sup>
Mercúrio	1.16 x 10 <sup>-7</sup>
Óleo SAE 30	3.25 x 10 <sup>-4</sup>
Glicerina	1.18 x 10 <sup>-3</sup>

Secção Eng.ª Rural

23

O perfil de velocidades na secção transversal de um fluido em escoamento é uma consequência da viscosidade



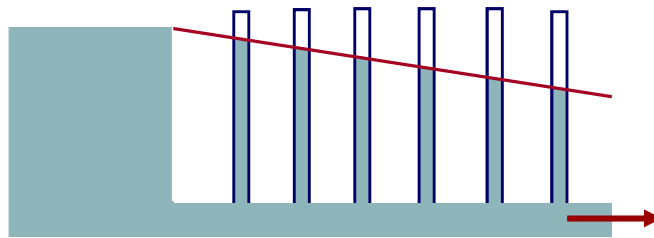
A viscosidade de um fluido representa a taxa à qual a quantidade de movimento é transmitida através do fluido.

Secção Eng.ª Rural

24

A acção da viscosidade no escoamento dos fluidos traduz-se pelo aparecimento de **forças de resistência**, que **realizando trabalho negativo** originam **dissipação de parte da energia mecânica** do fluido em movimento.

Líquidos reais – a **energia total (mecânica)** decresce ao longo do percurso



O declive do segmento de recta corresponde à perda de energia por unidade de comprimento

Variação da viscosidade com a pressão e com a temperatura

Viscosidade		Temperatura		Pressão	
		▲	▼	▲	▼
dinâmica	líquidos	diminui ▼	aumenta ▲	Independente *	
	gases	aumenta ▲	diminui ▼	Independente *	
cinemática	líquidos	diminui ▼	aumenta ▲	Independente *	
	gases	aumenta ▲	diminui ▼	inversamente proporcional	

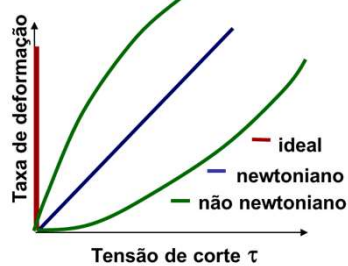
\* A viscosidade dinâmica é praticamente independente da pressão quer para líquidos quer para gases, com as seguintes excepções: nos **líquidos** a muito altas pressões e nos **gases** a muito altas e muito baixas pressões.

Os fluidos são classificados em função da **relação entre força tangencial aplicada por unidade de área e taxa de deformação do fluido** (essa relação é representada por  $\mu$ )

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



Para a mesma temperatura



Se a taxa de deformação do fluido variar com a  $\tau$  (m varia para a mesma T), o fluido não segue a lei da viscosidade de Newton. O fluido diz-se **Não Newtoniano**. Ex: vários tipos de águas residuais de origem agrícola.

Secção Eng.º Rural

**Consequência da viscosidade - Escoamento laminar e escoamento turbulento  $n^\circ$  Reynolds**

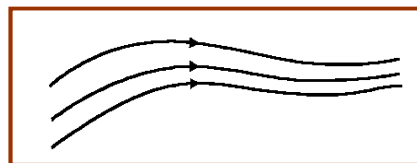
De acordo com as características dos escoamento e as propriedades de transporte do fluido, este pode apresentar escoamento **laminar** ou **turbulento**

Escoamento laminar

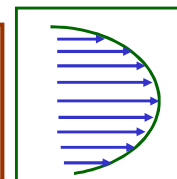
- As partículas descrevem trajectórias suaves;
- A viscosidade elimina qualquer tendência para a turbulência;
- As trajectórias nunca se interceptam.



O escoamento é feito por camadas de fluido, que deslizando muito suavemente umas sobre as outras não se misturarem



Perfil longitudinal do escoamento

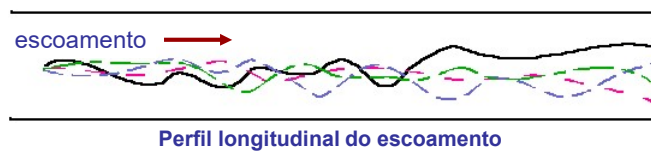


Perfil de velocidades

Secção Eng.º Rural

### Escoamento turbulento

- A viscosidade não é suficiente para impedir as perturbações no escoamento
- As partículas descrevem trajetórias muito irregulares, existindo mistura das diferentes camadas de fluido
- As trajetórias do escoamento interceptam-se



- Existe uma direção de escoamento definida

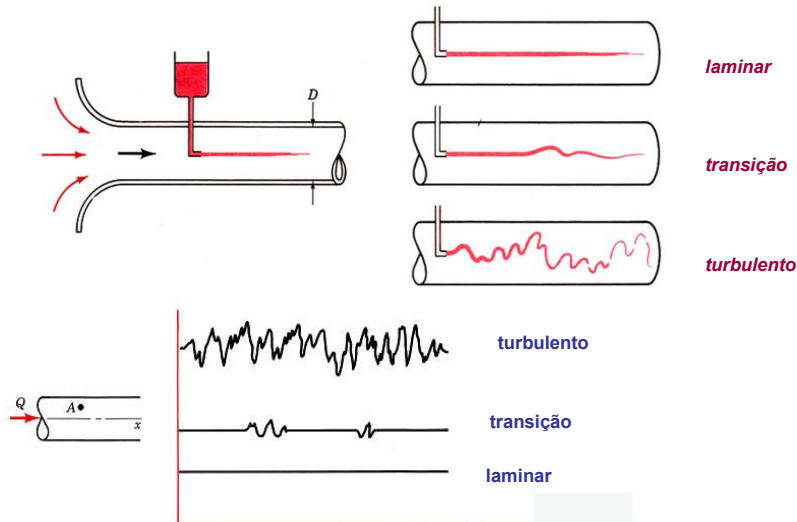
### Escoamentos muito turbulentos



### Número de Reynolds

A classificação do escoamento em laminar ou turbulento é feita com base no nº de Reynolds,  $\mathcal{R}_e$

#### 1ª Experiência de Reynolds:



31

$$\mathcal{R}_e = \frac{\rho u \ell}{\mu}$$

$\rho$  = massa volúmica do fluido [ $M L^{-3}$ ],  
 $u$  = velocidade do fluido [ $LT^{-1}$ ],  
 $\ell$  = comprimento característico da geometria do meio [ $L$ ]  
 $\mu$  = viscosidade dinâmica [ $L M^{-1} T^{-1}$ ]

- adimensional
- expressa a importância relativa das forças de **inércia** e das forças de **viscosidade (resistência ao escoamento)**
- um número de Reynolds pequeno está associado ao escoamento **laminar** e um número grande ao escoamento **turbulento**

Para escoamento em tubos, o comprimento característico,  $\ell$  é o diâmetro do tubo,  $d$ :

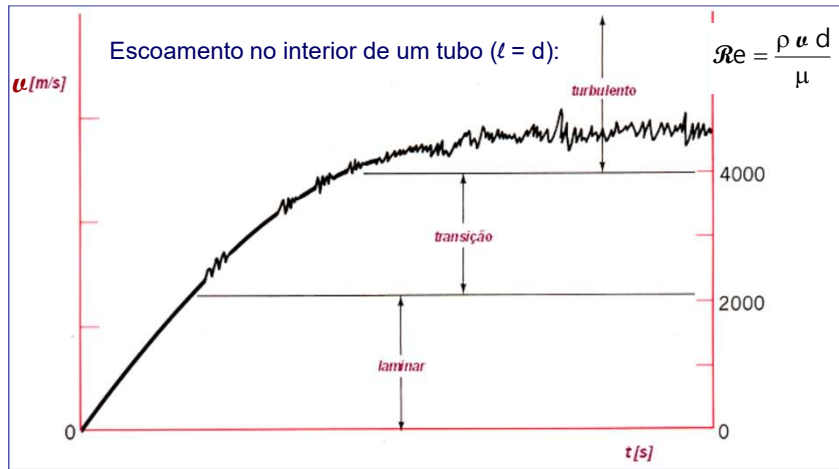
$$\mathcal{R}_e = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu}$$

$\rho$  = massa volúmica do fluido [ $M L^{-3}$ ],  
 $u$  = velocidade do fluido [ $LT^{-1}$ ],  
 $d$  = diâmetro do tubo,  
 $\mu$  = viscosidade dinâmica [ $L M^{-1} T^{-1}$ ] e  
 $\nu$  = viscosidade cinemática [ $L^2 T^{-1}$ ].

$$\mu = \rho \nu$$

32





$Re < 2000$  regime laminar

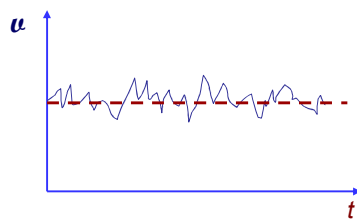
$2000 < Re < 4000$  regime de transição

$Re > 4000$  regime turbulento

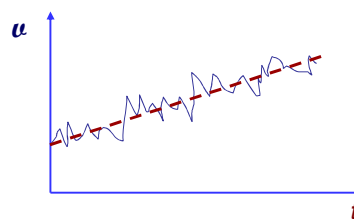
Coerência com o conceito de permanência

- Regime laminar – valores instantâneos
- Regime turbulento – valores médios

O conceito de permanência do escoamento, será dado mais à frente, no capítulo da cinemática



Regime turbulento “permanente”



Regime turbulento “não permanente”

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = \frac{u d}{\nu}$$

Diâmetro do tubo:  
 $\phi = 1" = 25,4 \text{ mm} = 25,4 \times 10^{-3} \text{ m}$

Ocorrência de regime laminar:  $Re < 2000$

$$u < \frac{Re \nu}{d} < \frac{2000 \nu}{25,4 \times 10^{-3}} < 78,7 \times 10^3 \nu$$

Água:	$\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$u < 78,7 \times 10^3 \times 10^{-6} < 0,08 \text{ m s}^{-1}$
Óleo:	$\nu = 200 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	$u < 78,7 \times 10^3 \times 200 \times 10^{-6} < 15,7 \text{ m s}^{-1}$

Velocidades de circulação recomendadas (m s <sup>-1</sup> )				
Água	Habitacões	0.7 a 1.7	Indústria	1.7 a 3.5
Óleo	Aspiração	1.0 a 2.0	Compressão	1.5 a 2.5
Ar	8.0 a 10.0			