

# Física do Corpo Humano

Licenciatura em Física

Percursos C – Física Médica

Ano letivo de 2021/2022 1º semestre.

Fluidos - Poiseuille - Reynolds

Estas notas resultam directamente da adaptação de materiais de apoio utilizados nas aulas de Física do Corpo Humano para o curso de Licenciatura em Física – Percurso C – Física Médica, para o ano letivo de 2021/2022.

São facultadas apenas para servirem como guia das matérias abordadas, podendo ser vistas como “sumários” alargados e ilustrados de cada um dos temas. Sendo, na sua maioria, cópias directas dos “slides” apresentados **não devem**, pelo exposto, **ser tomadas como elemento de estudo**.

As publicações referidas na bibliografia (todas elas existentes nas bibliotecas da Universidade do Minho e /ou na posse do docente responsável) deverão servir para o estudo aprofundado dos temas tratados nesta unidade curricular.

Francisco J. M. Macedo  
(DF – UM)

# Viscosidade e Fluxo Laminar: Lei de Poiseuille



Água → desloca-se livremente e rapidamente.

Mel → desloca-se lentamente e “agarra-se” ao recipiente.

Causa → atrito quer entre o fluido e as paredes do recipiente quer dentro do próprio fluido.

Propriedade → **viscosidade** ( $\eta$ )

Resistência de um fluido ao escoamento  
>  $\eta \Rightarrow$  < **velocidade** (mesmas condições)

A definição exata da viscosidade baseia-se num **fluxo laminar** (não turbulento).

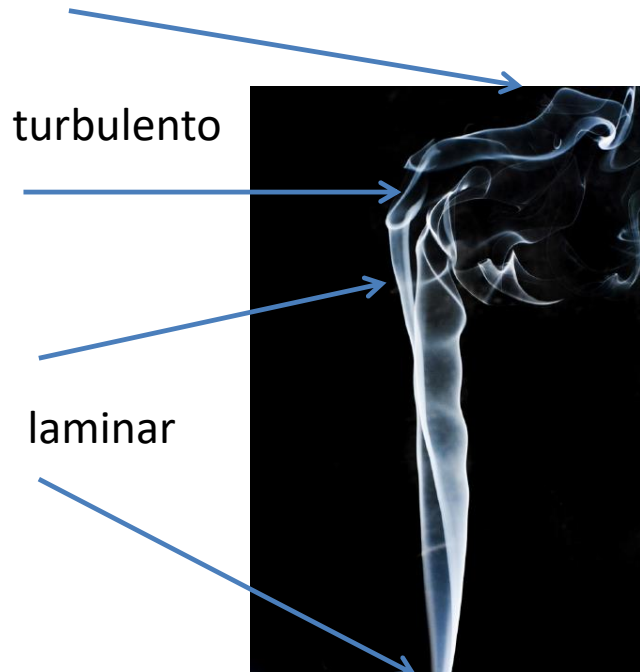
Para definir viscosidade é pois necessário **distinguir** fluxo **laminar** de fluxo **turbulento**.



# Viscosidade e Fluxo Laminar: Lei de Poiseuille

**Fluxo ou escoamento laminar** → caracterizado por um fluxo suave do fluido em camadas que não se misturam.

O fluxo turbulento, ou turbulência → caracterizado por turbilhões e redemoinhos ocorrendo **mistura entre camadas de fluido**.



O fumo sobe suavemente durante algum tempo e, em seguida, começam a formar-se redemoinhos e turbilhões.

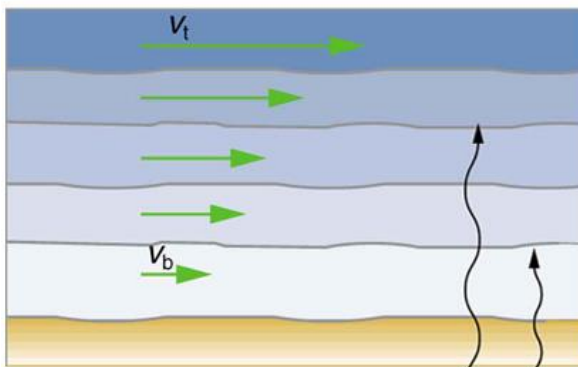
Nota-se também que o fumo sobe mais rapidamente quando flui suavemente do que depois, quando o fluxo fica turbulento.

⇒ a turbulência impõe maior resistência ao fluxo.

## Fluxo Laminar e turbulento

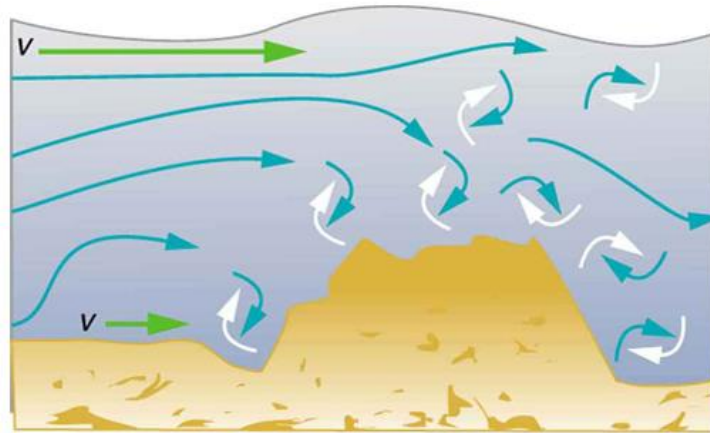
As camadas fluem sem se misturarem quando o fluxo é laminar.

Quando ocorre turbulência, as camadas misturam-se e ocorrem movimentos significativos em direções diferentes da direção do fluxo.



Atrito entre as diferentes camadas

(a)



(b)

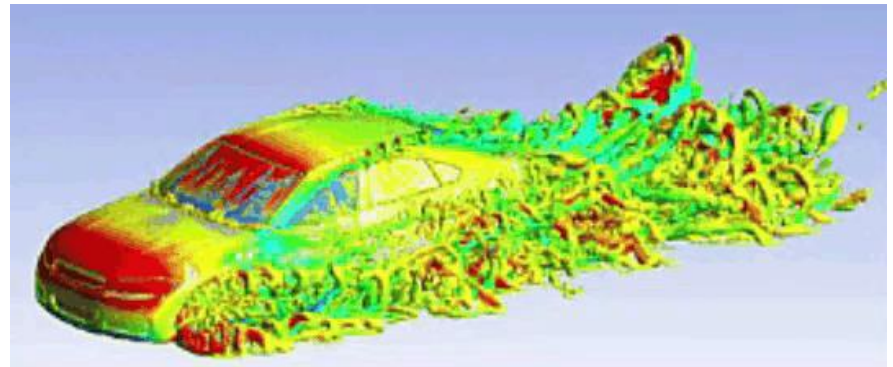
(a) Fluxo laminar. Nota-se que a viscosidade causa fricção entre as camadas do fluido bem como com a superfície fixa do “recipiente”.

(b) A obstrução produz turbulência. Existe **maior interação**, **maior aquecimento** e **maior resistência** do que no fluxo laminar.

As linhas de corrente são suaves e contínuas quando o fluxo é laminar, mas quebram-se e misturam-se quando o fluxo é turbulento.

Turbulência (como a da figura) tem duas causas principais:

- uma obstrução ou uma esquina geram turbulência ao introduzirem velocidades perpendiculares à direção do fluxo.
- velocidades altas geram turbulência. O arrasto entre camadas adjacentes do fluido e entre o fluido e o meio circundante origina redemoinhos e turbilhões se a velocidade for suficientemente alta.

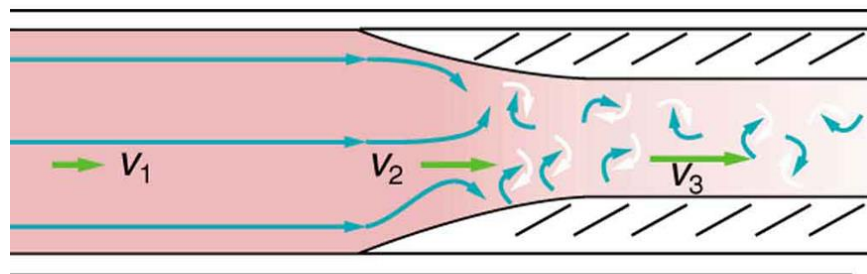


Qual o critério objetivo para definirmos se um regime é laminar ou turbulento?

## Fluxo laminar ou turbulento? Número de Reynolds

Ex: Sabemos que o fluxo num tubo muito liso ou em torno de um objeto aerodinâmico suave será **laminar** a **baixa velocidade**. Sabemos também que, em **velocidades altas** o mesmo fluxo experimentará **turbulência**.

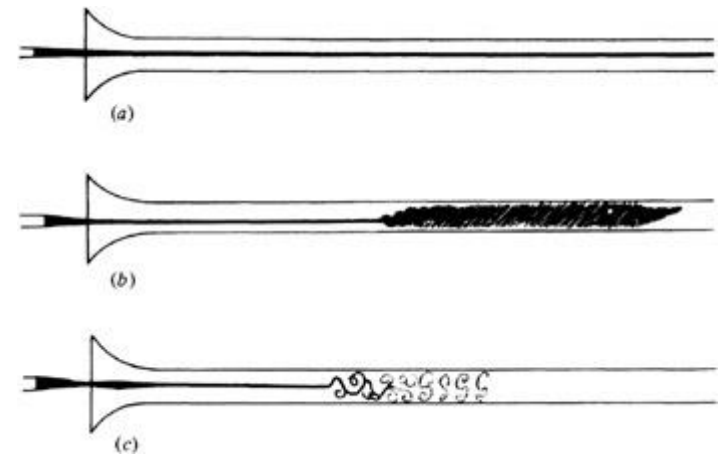
E entre as duas situações? A velocidades intermédias, o fluxo pode oscilar para trás e para a frente infinitamente entre laminar e turbulento.



Laminar

Turbulento

Transição  
Oscila entre  
laminar e turbulento



Resultado da experiência original de Reynolds.

## Número de Reynolds

Ex: uma oclusão ou estreitamento de uma artéria é susceptível de provocar turbulência por causa da irregularidade do bloqueio.

A turbulência no sistema circulatório é “barulhenta” e às vezes pode ser detectado com um estetoscópio.

Sopros cardíacos, como o nome indica, são detetáveis pelos sons produzidos pelo fluxo turbulento em torno de válvulas cardíacas danificadas ou insuficientemente fechadas.

a - SERPENTEANTE (atm superadiabática) – Figura 8. 22 e 8.23.



Escoamentos na atmosfera terrestre como o dos penachos de saída das chaminés de unidades industriais, são invariavelmente turbulentos.



**Número de Reynolds ( $R_e$ )**  $\rightarrow$  indica se o fluxo é laminar ou turbulento.  
permite estabelecer a “transição”

Para o **fluxo num tubo de diâmetro uniforme**, o número de Reynolds é definido como:

$$R_e = \frac{2\rho v r}{\eta}$$

onde  $\rho$  é a massa volúmica do fluido,  $v$  a velocidade,  $\eta$  a sua viscosidade, e  $r$  o raio do tubo.

O número de Reynolds ( $R_e$ ) é **adimensional**.

As experiências revelaram que  $R_e$  se relaciona com o aparecimento de turbulência.

$R_e < \sim 2000 \Rightarrow$  fluxo laminar

$R_e > \sim 3000 \Rightarrow$  fluxo é turbulento

$2000 < R_e < 3000 \Rightarrow$  o fluxo é instável\*

\*pode ser laminar, mas pequenas obstruções e rugosidade da superfície podem torná-lo turbulento, e pode oscilar aleatoriamente entre laminar e turbulento.

Ex: O fluxo de sangue durante na maior parte do corpo humano é um fluxo laminar. A exceção é na aorta, em que quando a velocidade do fluxo de sangue sobe acima de um valor crítico de 35 cm/s se torna turbulento.

## Número de Reynolds

Ex. Aplicação:

Um sistema de “pipelines” no subsolo permite o transporte de gasolina entre uma refinaria e os fornecedores. Sendo a taxa de fluxo (ou caudal) de  $3.00 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  (ap. 500 litros por minuto), e sabendo que a viscosidade da gasolina é de  $6.00 \times 10^{-2} \text{ N/m}^2$  e a massa volúmica de  $680 \text{ kg/m}^3$ , calcule o diâmetro mínimo que o tubo deve ter de modo a que o fluxo possa ser considerado laminar.

Não sabemos a velocidade  $\langle v \rangle$  do fluído, mas  $\langle v \rangle = Q / A = 3.00 \times 10^{-2} / (\pi r^2)$

Sendo

$$R_e = \frac{2\rho \langle v \rangle r}{\eta} < 2000$$

Chega-se a:

$$r > 0.108 \text{ m} \rightarrow d > 0.216 \text{ m}$$

## Número de Reynolds

## Outras situações...

Um objecto em movimento num fluido viscoso é equivalente a um objecto estacionário, dentro de um fluido em movimento.

O fluxo do fluido em relação ao objecto, que se encontra em movimento, pode ser laminar, turbulento, ou uma combinação dos dois.

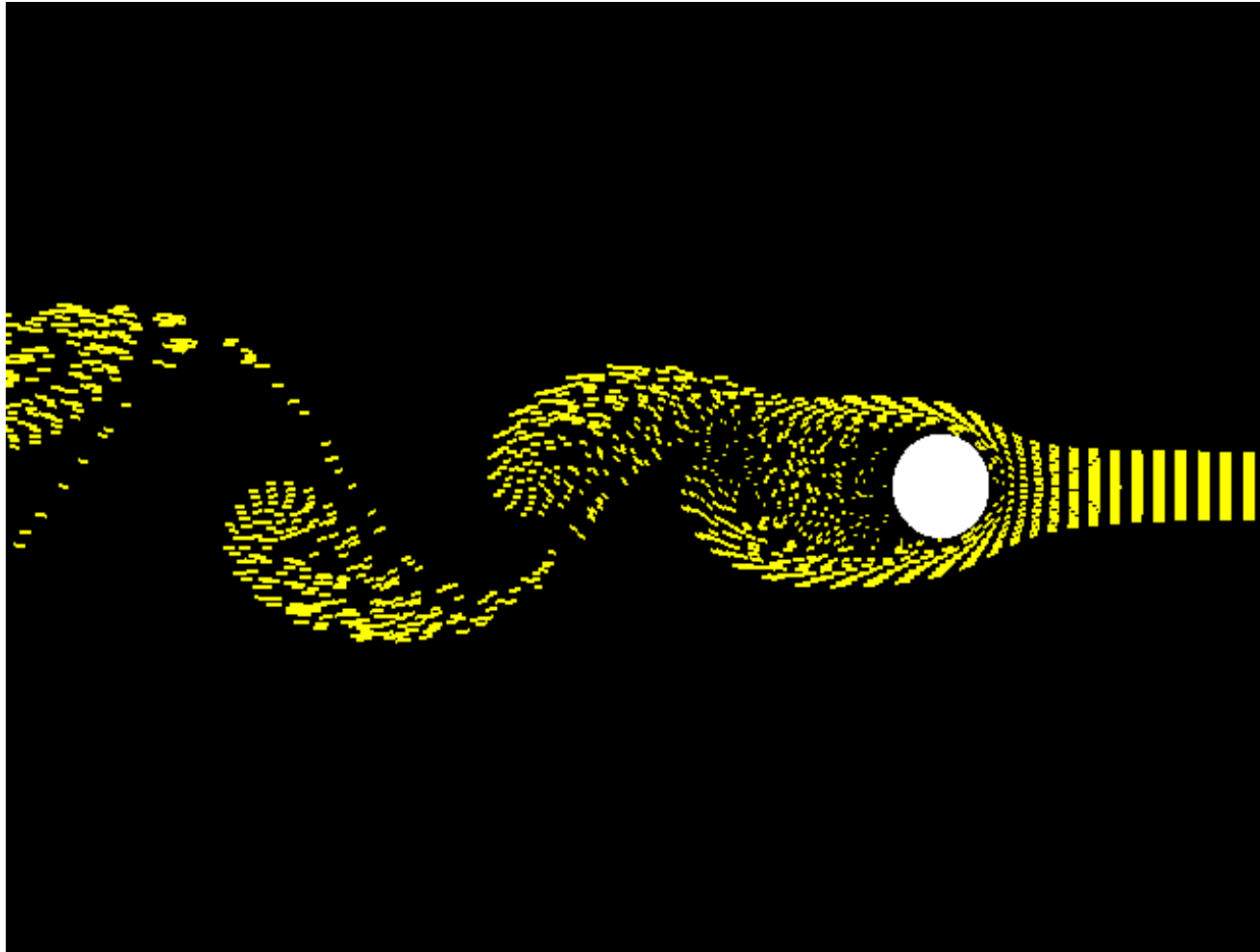
Assim como com o fluxo nos tubos, é possível prever quando um objecto em movimento cria turbulência. Usamos uma outra forma do número de Reynolds definido para um objecto em movimento num fluido (ou um fluido que flui através de um objecto) como

$$R_e = \frac{\rho v L}{\eta}$$

em que  $L$  é um comprimento característico do objecto (o diâmetro de uma esfera, por exemplo) e  $v$  a velocidade do objecto no líquido (ou a velocidade de aproximação do fluido para o objecto).

# Número de Reynolds

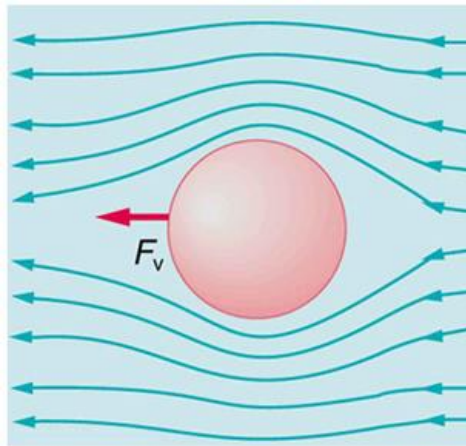
[Fluxo à volta de uma esfera](https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html) (<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/dragsphere.html>)



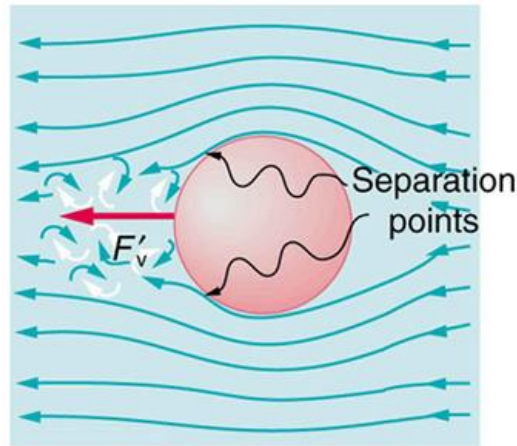
Fonte: Nasa: Drag of a sphere

## Número de Reynolds

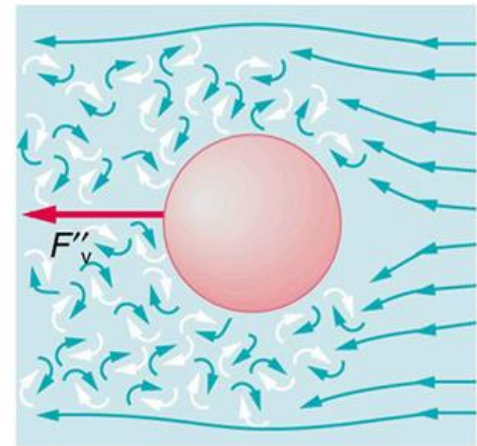
Uma das consequências de viscosidade é uma força de resistência,  $F_v$ , chamada força arrasto viscoso, que é exercida sobre um objeto em movimento no fluido.



(a)



(b)



(c)

(a) O movimento desta esfera para a direita é equivalente ao fluxo de fluido para a esquerda. Aqui, o fluxo é laminar, com  $R_e$  menor que 1. Existe uma força, chamada “força de arrasto viscoso”,  $F_v$ , para a esquerda sobre a esfera, devido à viscosidade do fluido.

(b) A uma velocidade mais elevada, o fluxo torna-se parcialmente turbulento, criando um rasto, onde as linhas de fluxo se separam da superfície.

(c) Em velocidades muito mais altas, em que  $R_e$  é maior do que  $10^6$ , o fluxo torna-se turbulento em toda a superfície e por trás da esfera. A força de arrasto aumenta drasticamente.

Número de Reynolds ( $R_e$ ) → indica se o fluxo é laminar ou turbulento.  
permite estabelecer a “transição”

Para um escoamento nestas condições temos as seguintes gamas aproximadas:

$0 < R_e < 1$ : fluxo **laminar** “lento”, altamente viscoso

$1 < R_e < 100$ : fluxo **laminar**, forte dependência de  $R_e$

$100 < R_e < 10^3$ : **laminar**, “normal”

$10^3 < R_e < 10^4$ : **transição** para regime turbulento (2000-3000 para o escoamento num tubo)

$10^4 < R_e < 10^6$ : **turbulento**, dependência moderada em  $R_e$

$R_e > 10^6$ : **turbulento**, pouco dependente de  $R_e$

Nota: estas gamas são representativas. De facto, os valores podem variar conforme a geometria do escoamento, a rugosidade das superfícies, .....

O fluxo laminar ocorre principalmente quando os objetos dentro do fluido são pequenos, como pingos de chuva, pólen e as células do sangue em plasma.

Experiências mostraram que

- para o fluxo laminar ( $R_e < 1$ ) a força de arrasto viscoso é proporcional à velocidade;
- para  $R_e$  entre cerca de 10 e  $10^6$ , o arrasto viscoso é proporcional ao quadrado da velocidade;
- para  $R_e$  maior do que  $10^6$ , o arrasto aumenta dramaticamente e o comportamento é de maior complexidade.

Para um fluxo laminar em torno de uma esfera,  $F_v$  é proporcional à viscosidade do fluido  $\eta$ , ao tamanho característico do objecto,  $L$ , e à sua velocidade  $v$

Para o caso especial de uma pequena esfera de raio  $R$  movendo-se lentamente num fluido de viscosidade  $\eta$ , a força de arrasto, neste caso designada por  $F_s$ , é dada por:

$$F_s = 6\pi R\eta v$$

que é a chamada **lei de Stokes** (válida para  $R_e < 0.1$  )

## Fluxo laminar em Tubos: Lei de Poiseuille

O que causa o fluxo? → diferença de pressão

Relação simples entre o fluxo horizontal e a pressão.

O **caudal** ou taxa de fluxo,  $Q$ , está na direção de alta para baixa pressão. Quanto maior for a diferença de pressão entre dois pontos, maior será o caudal. Esta relação pode ser indicada como

$$Q = \frac{(P_2 - P_1)}{R}$$

em que  $P_1$  e  $P_2$  são as pressões de dois pontos como, por exemplo, na extremidade inicial ( $P_2$ ) e na extremidade final ( $P_1$ ), e  $R$  é a resistência ao fluxo.

A resistência  $R$  inclui tudo o que, à exceção da pressão, afete o caudal:

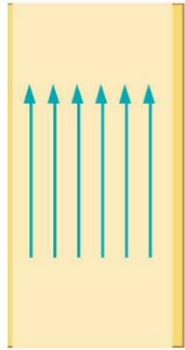
- $R$  é maior para um tubo longo do que para um curto;
- Quanto maior for a viscosidade de um fluido, maior será o valor de  $R$ ;
- A turbulência aumenta muito  $R$ ;
- o aumento do diâmetro de um tubo diminui  $R$ .

Se a viscosidade for igual a zero, a resistência ao fluxo é nula.



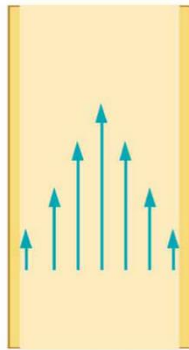
Não Viscoso

$$\eta = 0$$



(a)

Viscoso



(b)



(c)

(a) Se a resistência ao fluxo for muito pequena, a velocidade do fluido é sempre a mesma.

(b) No caso do escoamento de um fluido viscoso num tubo, a velocidade é nula nas paredes do tubo aumentando até ao seu valor máximo no centro do tubo.

(c) A forma da chama num bico de Bunsen é devida ao perfil de velocidades dentro do tubo.

A resistência  $R$  ao fluxo laminar de um fluido incompressível, com viscosidade  $\eta$ , através de um tubo horizontal de raio uniforme  $r$  e comprimento  $l$ , é dada por:

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

Esta equação designa-se por lei da resistência de Poiseuille.

---

J.L. Poiseuille (1799-1869) foi um cientista francês que deduziu esta lei quando estava a tentar perceber o modo como ocorre o escoamento do sangue.

A expressão de Poiseuille para  $R$  faz sentido?

Vemos que a resistência é diretamente proporcional tanto à viscosidade,  $\eta$ , como ao comprimento do tubo,  $l$ .

Como estes dois factores afectam directamente a “quantidade de atrito encontrado”, quanto maiores forem maior será a resistência e menor o fluxo.

O raio  $r$  do tubo afeta a resistência, o que novamente faz sentido, porque, intuitivamente, quanto maior o raio, maior o fluxo (todos os outros factores permanecendo constantes).

Mas é surpreendente que  $r$  esteja elevado à quarta potência na lei de Poiseuille. Este expoente significa que qualquer alteração no raio de um tubo tem um efeito muito grande sobre a resistência. Por exemplo, duplicando o raio de um tubo diminui a resistência por um factor de  $2^4 = 16$ .

Juntando as expressões

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

e

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) R}{8\eta l}$$

Obtém-se a seguinte equação para o caudal:

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) \pi r^4}{8\eta l}$$

Esta equação descreve o fluxo laminar através de um tubo horizontal, e designa-se por **lei de Poiseuille**.

Aplica-se a fluidos newtonianos em regime laminar.

$$\tau_{yx} = -\eta \frac{dv_x}{dy}$$

**Lei da viscosidade de Newton**

(Para fluidos não-newtonianos,  $\eta = f(v), \dots$ )

Turbulência normalmente implica grandes reduções do caudal...

**Exemplo 1:** Usando o caudal: Depósitos reduzem o fluxo sanguíneo

Suponhamos que o caudal de sangue na artéria coronária foi reduzido para metade do seu valor normal devido a depósitos de placas. Por que fator foi o raio da artéria reduzido, assumindo que não ocorre turbulência ?

Assuma que a diferença de pressão e a viscosidade do sangue se mantêm constantes.

Assumindo fluxo laminar, a lei de Poiseuille's indica que

$$Q = \frac{(P_2 - P_1) \pi r^4}{8 \eta l}$$

Torna-se necessário comparar o raio da artéria antes de depois da redução de caudal.

Assumindo uma diferença de pressão constante, o mesmo comprimento de artéria e uma mesma viscosidade do sangue tem-se

$$\frac{Q_1}{r_1^4} = \frac{Q_2}{r_2^4}$$

Assim, dado  $Q_2 = 0.5 Q_1$ , chega-se a

$$r_2^4 = 0.5 r_1^4$$

$$r_2 = (0.5)^{0.25} r_1 = 0.841 r_1$$

Um decréscimo de 16% no raio da artéria

Para restaurar o fluxo sanguíneo, compensando o efeito do decréscimo do raio da artéria, seria necessário um aumento da diferença de pressão ( $P_2 - P_1$ ) de um factor dois, com o consequente aumento de esforço no coração.

**Exemplo 2:** Que pressão produz um dado caudal?

Um sistema intravenoso (IV) fornece uma solução salina a um paciente a um caudal de  $0.120 \text{ cm}^3/\text{s}$  através de uma agulha com um raio de  $0.150 \text{ mm}$  e um comprimento de  $2.50 \text{ cm}$ . Qual a pressão necessária na entrada da agulha para originar esse caudal?

Assuma que a viscosidade da solução salina é a mesma da da água, que a pressão relativa do sangue na veia do paciente é de  $8.00 \text{ mm Hg}$  e que a temperatura é  $20^\circ\text{C}$ .

$$Q = \frac{(P_2 - P_1)\pi r^4}{8\eta l} \quad \Rightarrow \quad P_2 = \frac{8\eta l}{\pi r^4} Q + P_1$$

$P_1$  é dado como  $8.00 \text{ mm Hg}$ , que corresponde a  $1.066 \times 10^3 \text{ N/m}^2$ . Substituindo na equação, chega-se a

$$P_2 = 1.62 \times 10^4 \text{ N/m}^2$$

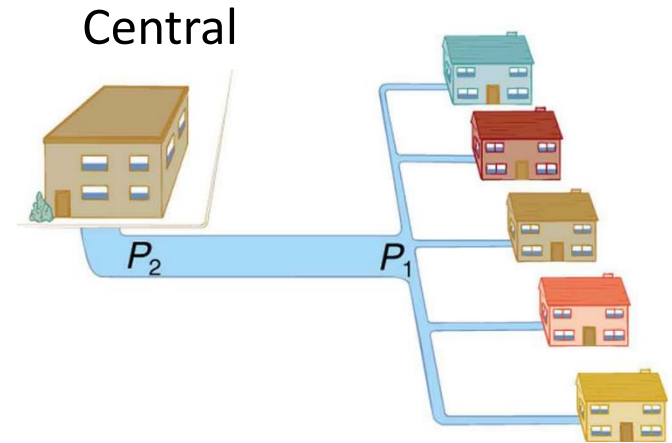
## Fluxo e Resistência como causas de quedas de pressão

Dias quentes de verão → mais uso de água → menor pressão “nas torneiras”

Esta queda de pressão ocorre nas condutas principais.

Considerando o fluxo através do tubo principal de abastecimento, temos:

$$Q = \frac{(P_2 - P_1)}{R} \Rightarrow (P_2 - P_1) = RQ$$



Podemos entender porque cai a pressão  $P_1$ , em casa, durante os períodos de uso elevado.

( $P_2$  é a pressão da água na estação de bombagem, e  $R$  é a resistência na conduta de água.)

Perante uma utilização elevada de água, o caudal,  $Q$ , é grande pelo que  $(P_2 - P_1)$  também tem de ser grande. Logo  $P_1$  tem de decrescer. É correcto pensar no fluxo,  $Q$ , e na resistência,  $R$ , como causas da queda de pressão de  $P_2$  para  $P_1$ .

A expressão  $P_2 - P_1 = RQ$  é válida para fluxo laminar bem como para fluxo turbulento

Pode-se usar  $P_2 - P_1 = RQ$  para analisar quedas de pressão que ocorrem em sistemas mais complexos em que o raio do tubo não é constante.

A resistência será muito maior em locais estreitos, como uma artéria coronária obstruída. Para um dado caudal,  $Q$ , a queda de pressão será maior em locais em que o tubo é mais estreito.

Esta é a maneira como torneiras de água controlam o caudal. Além disso,  $R$  aumenta muito com a turbulência, e um obstáculo que cria turbulência reduz muito a pressão a jusante.

Os depósitos em artérias reduzem a pressão e, por conseguinte, o fluxo, quer pela sua resistência quer pela turbulência que originam.

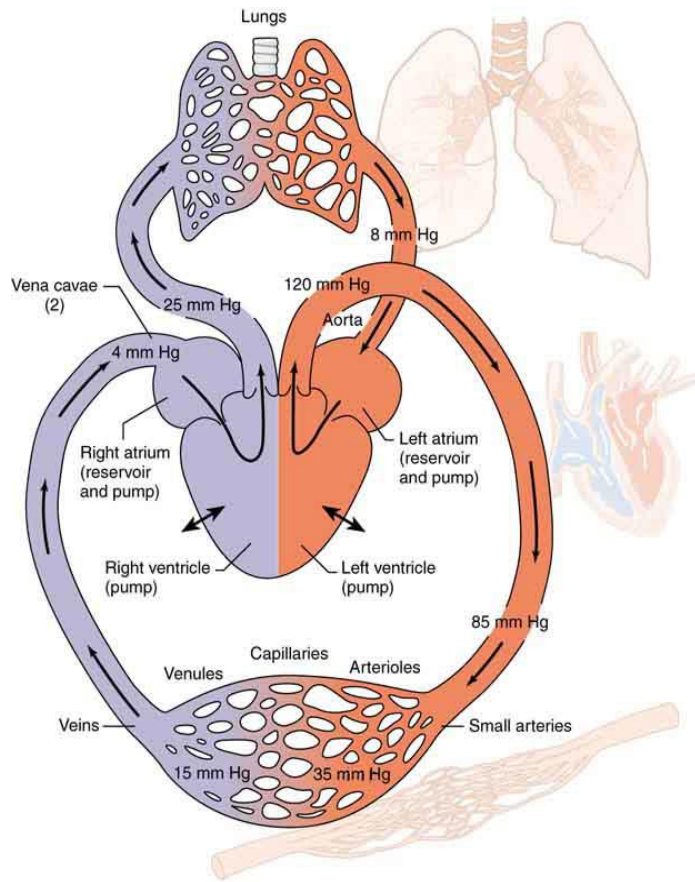
A figura mostra uma representação esquemática do sistema circulatório humano,.

Estão representadas as pressões médias de sangue nas principais zonas de um adulto em repouso.

A pressão criada por duas bombas do coração, os ventrículos direito e esquerdo, é reduzida pela resistência dos vasos sanguíneos à medida que o sangue flui através deles.

O ventrículo esquerdo aumenta a pressão sanguínea arterial o que origina o fluxo de sangue para todas as partes do corpo, com exceção dos pulmões.

O ventrículo direito recebe sangue a baixa pressão arterial, a partir de duas veias principais, e bombeia-o através dos pulmões para as trocas gasosas com os gases atmosféricos (eliminação de dióxido de carbono do sangue e reposição do oxigénio).

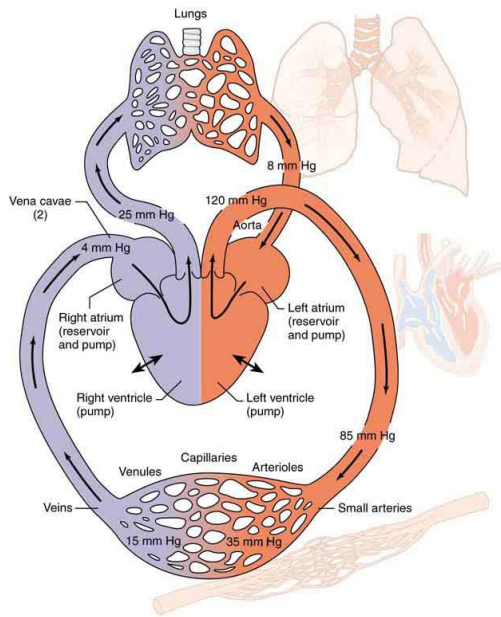


Ramificações semelhantes, das artérias para vasos cada vez menores, ocorrem numa variedade de órgãos no corpo humano.



O sistema circulatório tem uma considerável flexibilidade na **regulação do fluxo** nos órgãos através da dilatação e constrição das artérias que chegam aos órgãos e dos capilares dentro deles.

A **sensibilidade do fluxo ao raio do tubo** torna possível essa flexibilidade ao longo de uma grande variedade de caudais.



Cada ramificação de vasos maiores em vasos mais pequenos aumenta a área da secção transversal total dos tubos, através do qual o sangue flui.

Por exemplo, uma artéria, com uma secção transversal de  $1\text{cm}^2$  pode ramificar em 20 artérias mais pequenas, cada uma com secção transversal de  $0,5\text{ cm}^2$ , com um total de  $10\text{ cm}^2$ . Como  $Q = A v$  e  $A$  aumenta através das ramificações, a velocidade média do sangue nos vasos menores, é reduzida.

$$v_{aorta}(\phi = 1\text{ cm}) \approx 25\text{ cm/s}$$

$$v_{capilares}(\phi = 20\text{ }\mu\text{m}) \approx 0.1\text{ cm/s}$$



velocidade reduzida permite que o sangue troque de substâncias com as células nos vasos capilares e, em especial, nos alvéolos.

Os slides seguintes apenas são de leitura complementar facultativa, uma vez que os temas não foram desenvolvidos nas aulas por contingências de tempo, embora os conceitos fundamentais já tenham sido apresentados anteriormente.

## Ainda a viscosidade e os fluidos Newtonianos

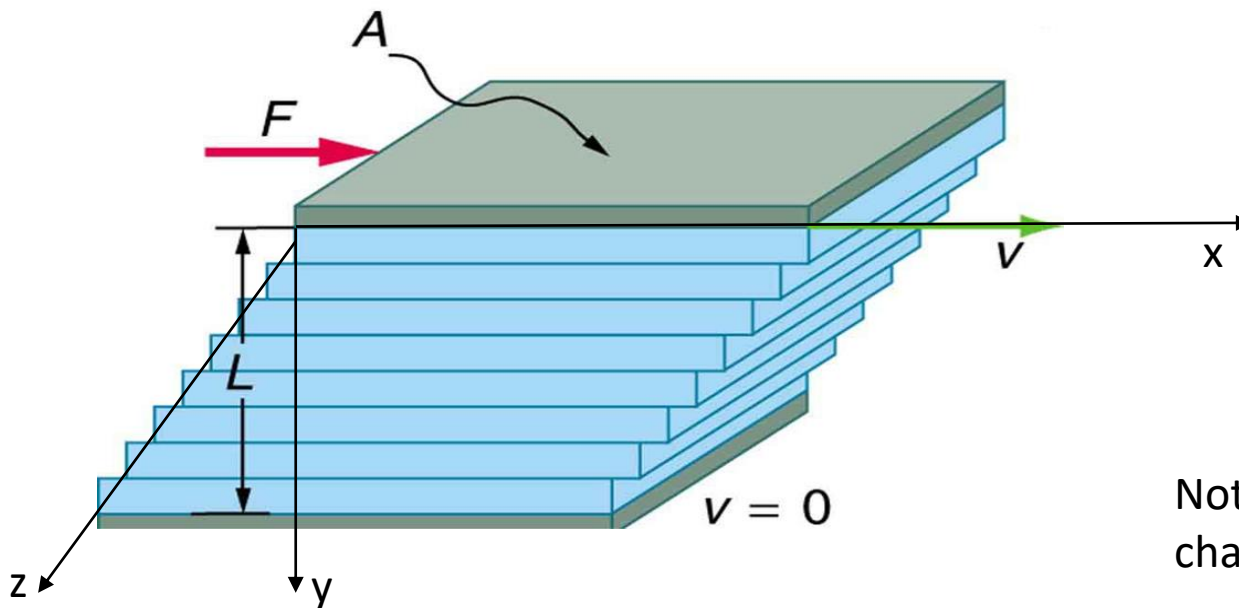
Como medir a viscosidade de um fluido?

Mantém-se fixa a placa do fundo. A placa superior é deslocada para a direita arrastando o fluido com ela.

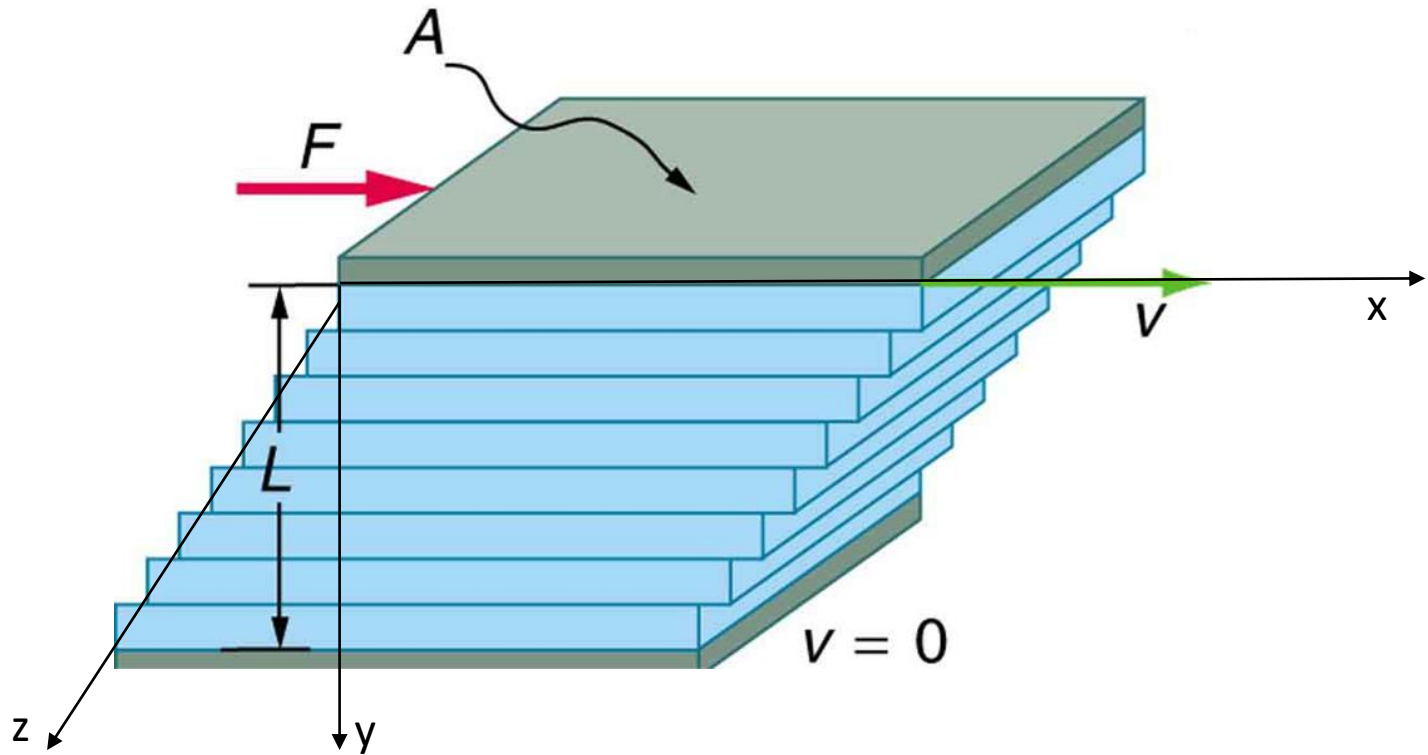
A “lâmina” de fluido em contacto com a placa não se move relativamente a ela.

⇒ camada do topo move-se com velocidade  $\mathbf{v}$  ao passo que a camada do fundo fica imóvel.

Cada camada sucessiva, a partir do topo, exerce uma força na camada imediatamente abaixo de modo a arrastá-la ⇒ variação contínua de velocidade, de  $\mathbf{v}$  até 0.



Nota: normalmente mede-se a chamada viscosidade dinâmica.



Deve-se ter cuidado para que o fluxo seja laminar de modo que as várias camadas não se misturem.

O movimento é provocado por uma tensão de corte,  $\tau$ . Os fluidos tem resistência nula a uma tensão de corte, mas a maneira como são deformados está relacionada com os mesmos factores geométricos,  $A$  e  $L$ , da deformação de sólidos por tensões de corte.

Uma força  $F$  é necessária para manter a placa do topo com uma velocidade constante  $v$ .

Medidas experimentais mostraram que essa força depende de 4 factores:

- $F$  é diretamente proporcional a  $v$   
(até que a velocidade seja tão alta que ocorra turbulência sendo então necessária uma força muito maior com uma dependência mais complexa em  $v$ )
- $F$  é proporcional à área da placa uma vez que  $A$  é diretamente proporcional à quantidade de fluido que se está a deslocar.
- $F$  é inversamente proporcional à distância entre as placas.
- $F$  é diretamente proporcional ao coeficiente de viscosidade  $\eta$ .  
Quanto maior a viscosidade maior é a força necessária

$$F = \eta \frac{vA}{L} \longrightarrow \eta = \frac{FL}{vA}$$

A unidade SI da viscosidade é então

$\text{N m}/(\text{m/s})\text{m}^2 = (\text{N}/\text{m}^2)\text{s}$  ou seja  $\text{Pa s}$ .

centipoise  $\rightarrow$  CGS  $\rightarrow$  1 mPa.s

Note-se que

$$F = \eta \frac{vA}{L} \Leftrightarrow \frac{F}{A} = \eta \frac{0 - v}{y - 0} = \eta \frac{\Delta v}{\Delta y}$$

Chegando-se a  $\tau_{yx} = \eta \frac{dv_x}{dy}$  Que constitui a **Lei da viscosidade de Newton**

Em que  $\tau_{yx}$  é a força  $F$  que atua na direção  $x$  numa seção reta de fluido que é perpendicular à direção  $y$ .

Sabe-se que a resistência ao escoamento em todos os gases e líquidos com baixo peso molecular é bem descrita pela lei de viscosidade de Newton sendo esses fluidos designados por **fluidos Newtonianos**.

**A viscosidade é constante...**

Outra interpretação é que o momento linear segundo x ( $p_x = mv_x$ ) está a ser transmitido através do fluido na direcção positiva do eixo y.

Assim  $\tau_{yx}$  pode também ser interpretado como o fluxo de  $p_x$  na direcção y, em que o termo fluxo de uma quantidade se refere ao transporte dessa quantidade por unidade de tempo e por unidade de área

$$( (\text{Kgm/s})/(\text{m}^2\text{s}) = \text{Kgms}^{-2}/\text{m}^2 = \text{N/m}^2 )$$

O momento linear é transmitido de zonas de alta velocidade para zonas de baixa velocidade.

O gradiente de velocidade pode então ser considerado como a força motriz do transporte de momento linear.

Outra quantidade útil é a viscosidade cinemática que corresponde à viscosidade (dinâmica) dividida pela massa volúmica do fluido.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Dois fluidos com a mesma viscosidade dinâmica podem apresentar viscosidades cinemáticas diferentes.

Dá-nos uma medida da taxa de transferência de momento entre os vários níveis do fluido.

A viscosidade pode variar de um fluido para outro por várias ordens de grandeza. A viscosidade dos gases é muito menor que a dos líquidos e observa-se normalmente uma dependência da viscosidade com a temperatura.

A viscosidade do sangue pode ser reduzida através do consumo de aspirina, permitindo que o sangue flua mais facilmente no corpo.

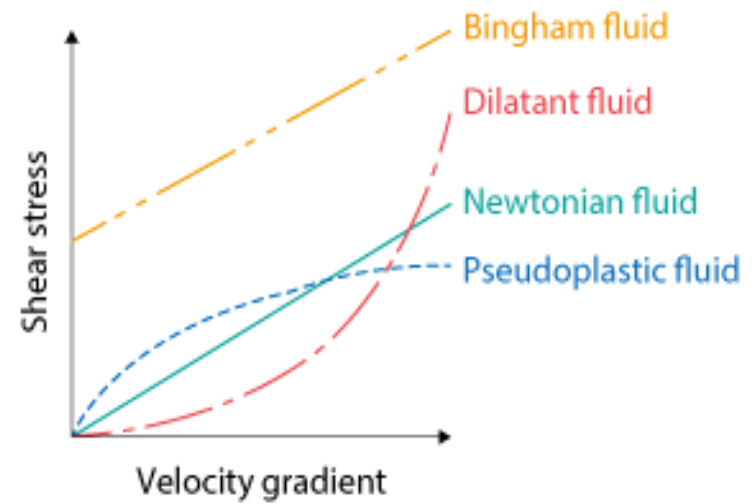
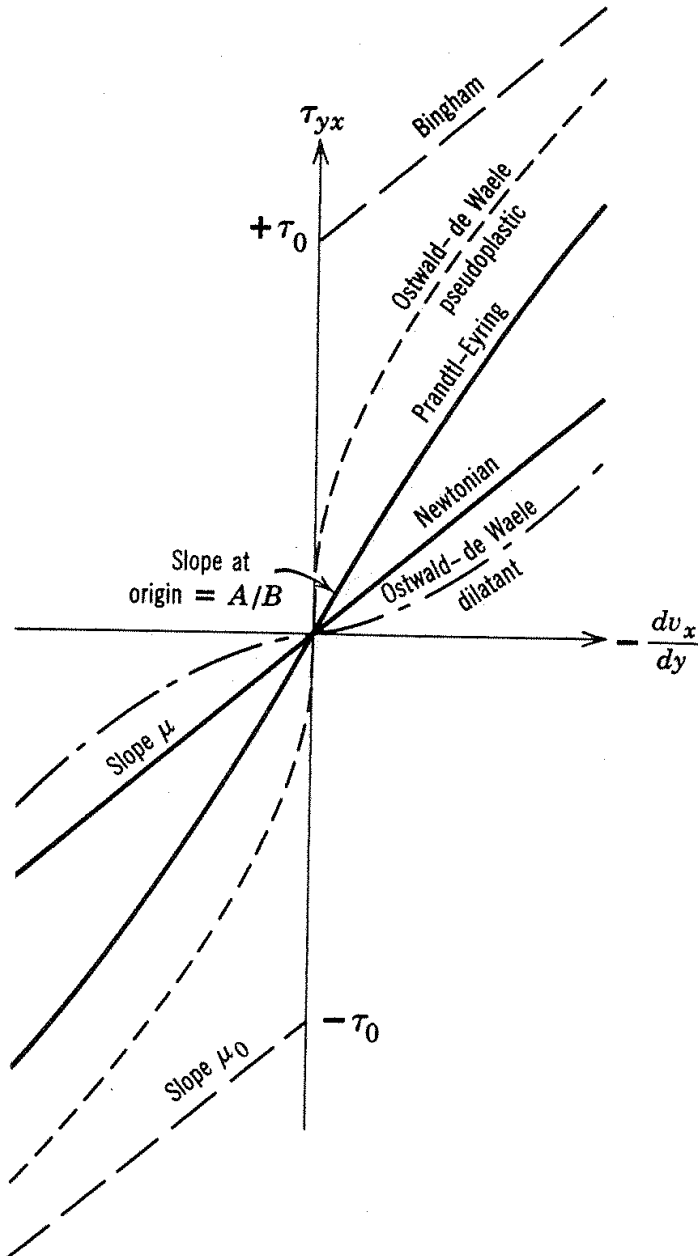
Coeficientes de viscosidade de vários fluidos

Fluído	Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)
Ar	0	0.0171
	20	0.0181
	40	0.0190
	100	0.0218
Amonia	20	0.00974
Dióxido de carbono	20	0.0147
Hélio	20	0.0196
Hidrogénio	0	0.0090
Mercúrio	20	0.0450
Oxigénio	20	0.0203
Vapor de água	100	0.0130



Fluído	Temperatura (°C)	Viscosidade (mPa.s)
Água	0	1.792
	20	1.002
	37	0.6947
	40	0.653
	100	0.282
Sangue (média)	20	3.015
	37	2.084
Plasma sanguíneo	20	1.810
	37	1.257
Alcool etílico	20	1.20
Metanol	20	0.584
Óleo (maquinas)	20	660
Óleo (motor, SAE10)	30	200
Azeite	20	138
Glicerina	20	1500
Mel	20	2000-10000
Xarope de Ácer	20	2000-3000
Leite	20	3.0

## Fluidos não-Newtonianos



## Fluidos não-Newtonianos

O modelo de Bingham

$$\tau_{yx} = -\eta_0 \frac{dv_x}{dy} \pm \tau_0 \quad se \quad |\tau_{yx}| > \tau_0$$

$$\frac{dv_x}{dy} = 0 \quad se \quad |\tau_{yx}| < \tau_0$$

Uma substância que se comporta de acordo com este modelo designa-se por plástico de Bingham:

- mantém-se rígido quando a tensão de corte é inferior a um valor limite,  $\tau_0$ ,
- comporta-se como um fluido Newtoniano quando a tensão de corte é superior a esse valor.

Este modelo é adequado, por exemplo, para pasta dentífrica e para manteiga.

## Fluidos não-Newtonianos

Para um “**pseudoplástico**” , à medida que o gradiente de velocidade aumenta, a viscosidade diminui e o fluido flui mais facilmente.

Ex: Ketchup

São “fáceis” de extrair a partir, por exemplo, de um tubo em que estão contidos.

Um “**dilatante**” , por oposição a um pseudoplástico, tem a característica de aumentar a viscosidade à medida que o gradiente de velocidade aumenta. Como consequência, é mais difícil fazer o fluido fluir.

Uma mistura de água e amido constitui um típico “dilatante”.

Quando a mistura se agita muito rapidamente, fica mais “espessa” e mais difícil de agitar.