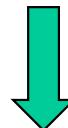


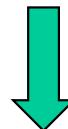
Transporte de propriedades: Calor, Massa, Quantidade de movimento

Quando ocorre uma diferença de concentração para qualquer uma destas propriedades, entre regiões diferentes de um mesmo sistema gera-se um transporte ou fluxo de massa, energia térmica ou momento

**OPERAÇÕES UNITÁRIAS ENVOLVEM TRANSPORTE DE
MOMENTO, MASSA OU CALOR**



**É NECESSÁRIO COMPREENDER OS MECANISMOS
ENVOLVIDOS**



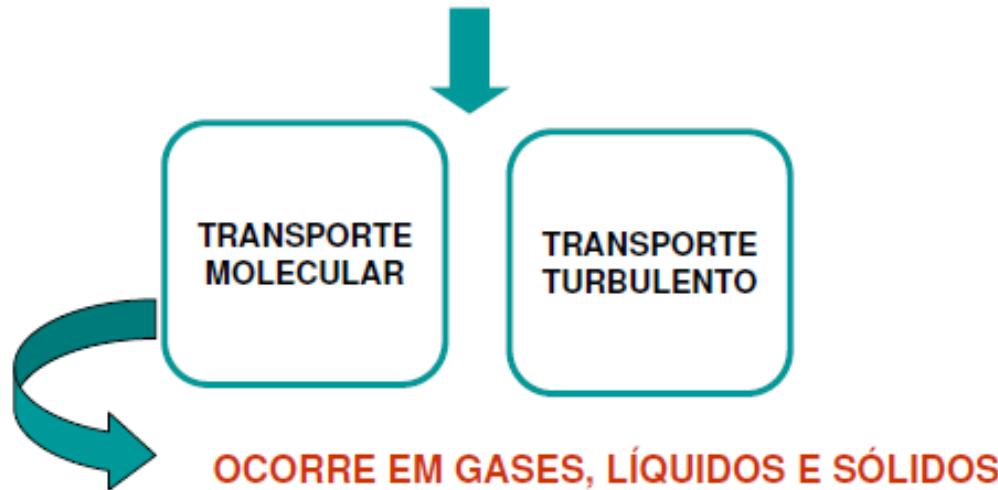
**CONHECER A VELOCIDADE DE TRANSPORTE DE
MOMENTO, MASSA OU CALOR**

**DIMENSIONAMENTO DO EQUIPAMENTO DAS
OPERAÇÕES UNITÁRIAS**

**MODELAÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DE
PROCESSOS**



OS MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSPORTE DE MASSA, CALOR E MOMENTO ESTÃO INTIMAMENTE RELACIONADOS



- Transporte
- **Mecanismo molecular:** ao nível molecular, molécula a molécula, microscópico
 - **Mecanismo turbulento:** envolve movimento em massa de um conjunto de moléculas, macroscópico (convecção)
 - **convecção natural**
 - **convecção forçada:** envolve aplicação de uma força externa

$$\text{Flow (velocity of the transport process)} = \frac{\text{driving force}}{\text{medium resistance}}$$

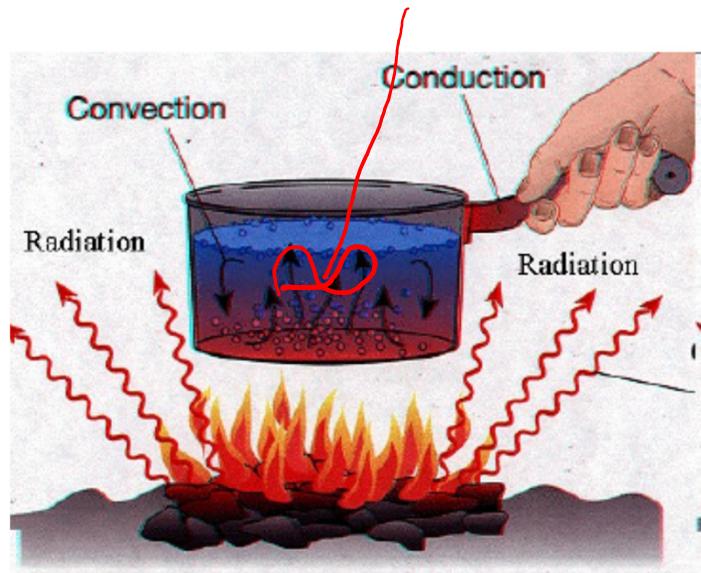
Transporte Molecular de Massa, Calor e Momento

Cada molécula possui uma certa quantidade de massa, energia térmica e momento a ela associada.

Transporte de Calor:

Se uma molécula possui maior energia interna devido a uma maior temperatura, poderá transferir energia para moléculas vizinhas com energia mais baixa (temperatura mais baixa).

Força motriz é ΔT



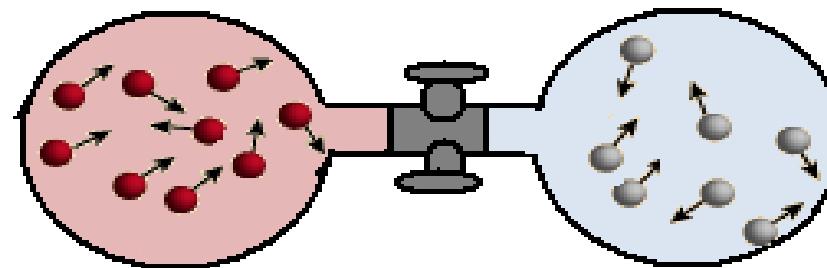
Transporte de Massa

(Difusão Molecular)

Se a concentração de uma espécie é maior numa região do que noutra, será transferida da região de maior concentração para a de menor concentração.

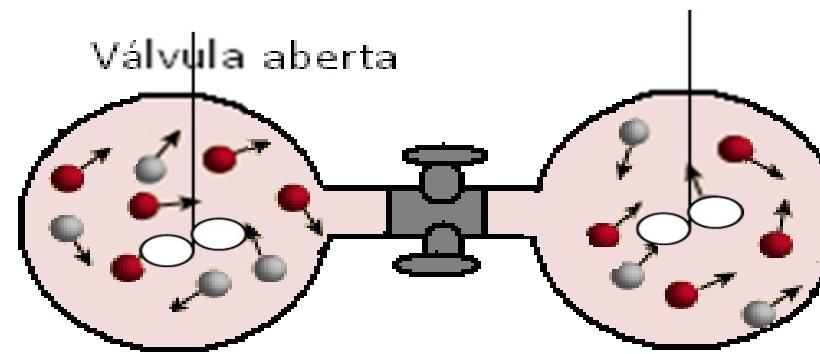
Difusão gasosa:

Válvula fechada



Força motriz é ΔC

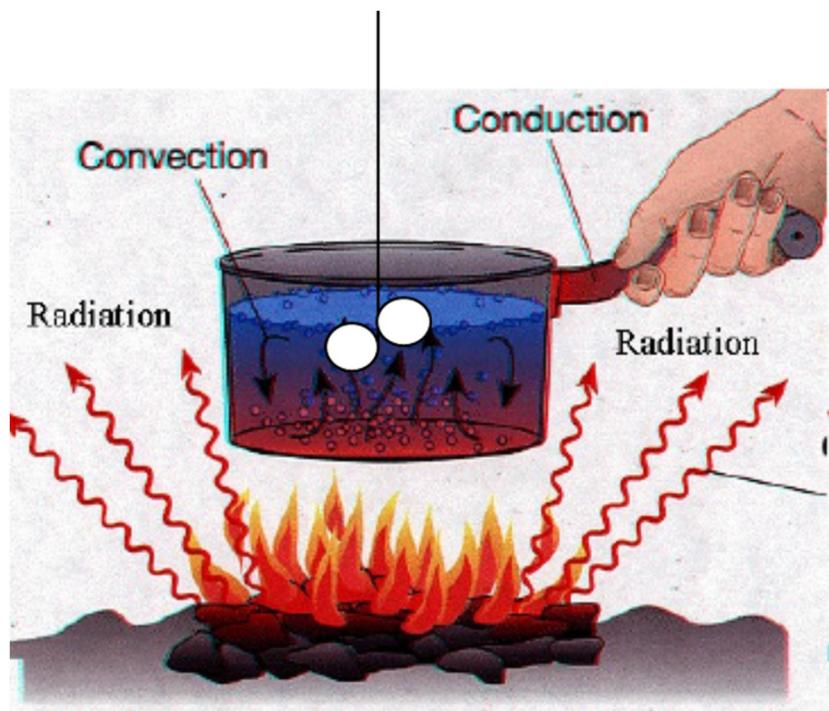
Válvula aberta



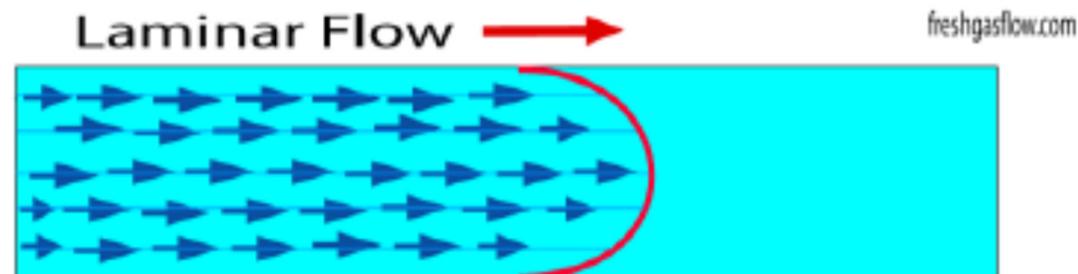
Transporte de momento ou quantidade de movimento:

Se um fluido está em movimento as moléculas possuem uma determinada quantidade de movimento (ou momento) na direcção do fluxo. As moléculas que se movem mais depressa possuem um momento maior e podem transferir o excesso de momento para as suas vizinhas que se movem mais lentamente

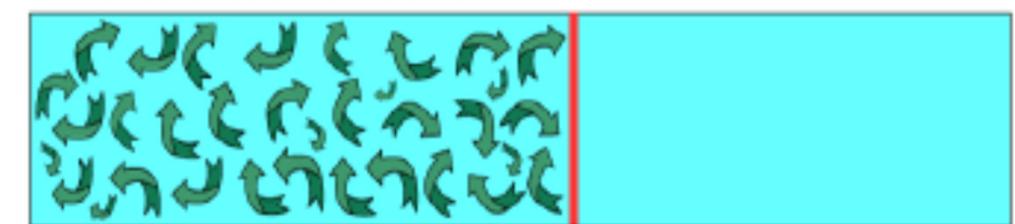
Força motriz é Δv



T. Mecanismo molecular

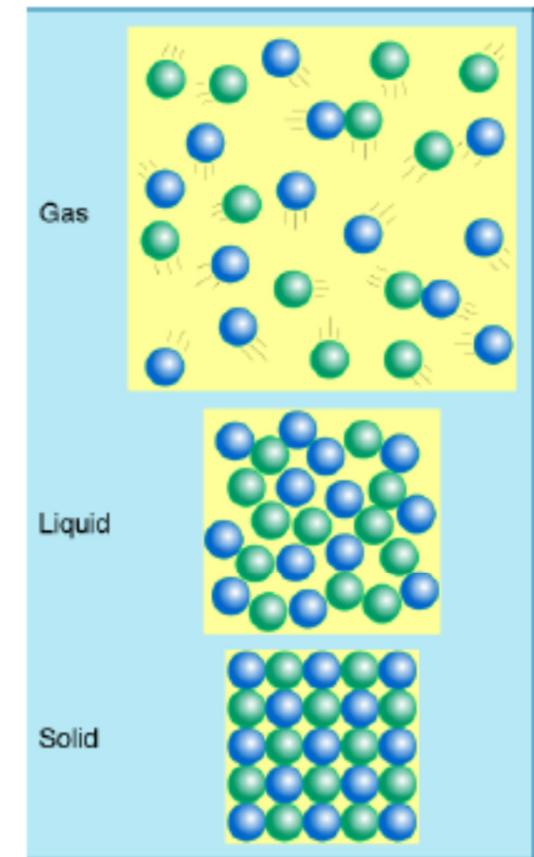
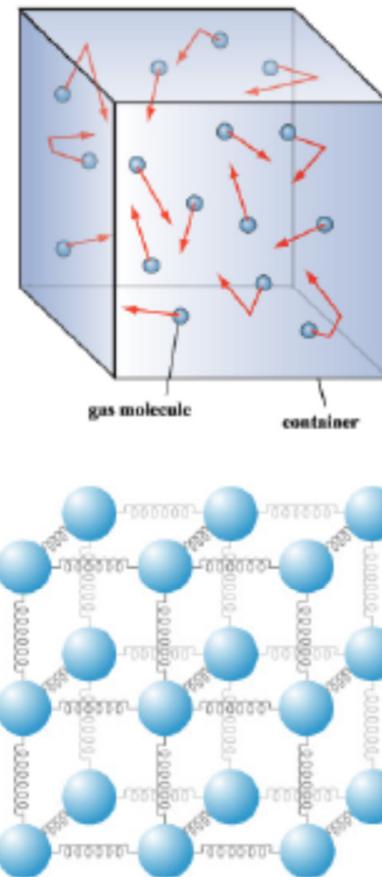
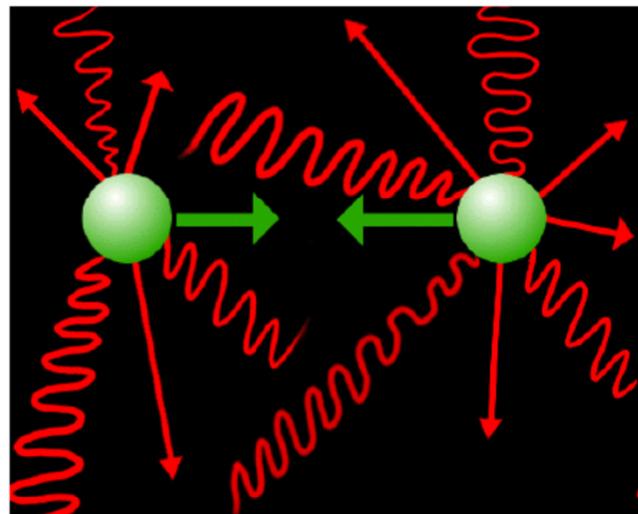


Turbulent Flow →



TRANSPORTE MOLECULAR

ocorre em gases, líquidos e sólidos



o mecanismo específico de transporte depende do estado físico do meio e da propriedade a transportar

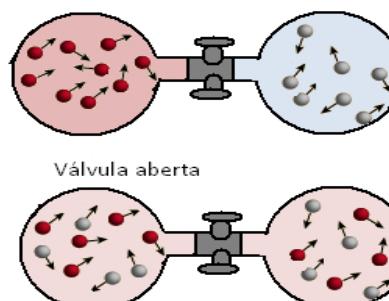
Equação geral de transporte molecular em estado estacionário pode ser aplicada a massa, momento ou calor

da teoria cinética dos gases:

$$\Psi = -\frac{1}{6}lc \frac{d\Gamma}{dx} \quad \Psi : \text{fluxo de propriedade } \Gamma$$

$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$

Difusão gasosa: le de transporte



Para gases reais e líquidos:

Transporte de Massa:

$$\frac{N_a}{A} = -D \frac{dC_a}{dx} \longrightarrow \text{FICK'S LAW}$$

$$\frac{N_a}{A} = -\frac{D}{R.T} \frac{dp_a}{dx}$$

N_a – rate of mass transport (mol/s)
 A – transport area (m^2)
 D – mass diffusivity (m^2 / s)
 C_a – concentration (mol/m^3)

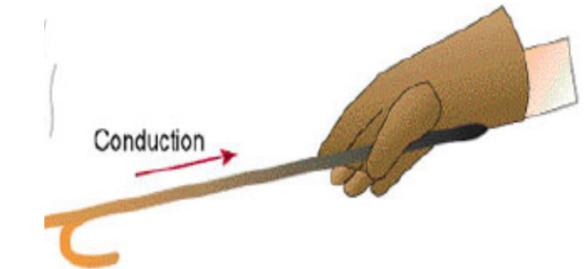
Difusividade mássica
Determinada experimentalmente
ou por correlações empíricas

Transporte de Calor:

$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$

$$\frac{q}{A} = -\alpha \frac{d(\rho C_p T)}{dx}$$

↓
 α – difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$)



Lei de Fourier (se k constante com T)

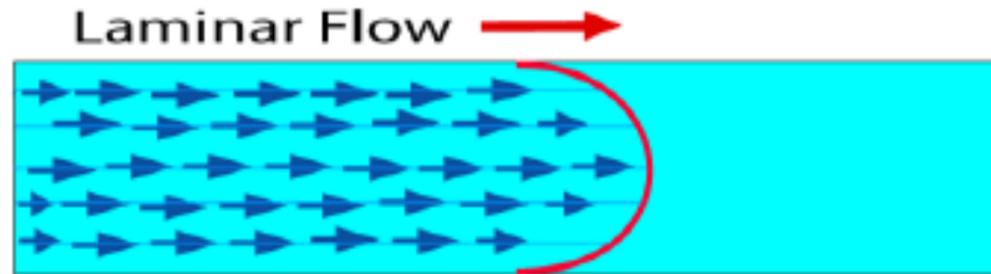
$$\frac{q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

q – velocidade de transferência de energia térmica ($J s^{-1}$)
A – área de transporte (m^2)
k – condutividade térmica ($J m^{-1} ^\circ C^{-1} s^{-1}$)
 C_p – calor específico ($J kg^{-1} ^\circ C^{-1}$)
 α – difusividade térmica ($m^2 s^{-1}$)

$$em \ que \ k = \alpha \cdot \rho \cdot C_p$$

Transporte de momento:

$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$



$$\tau_y = -\nu \frac{d(\rho v)}{dr} = -\mu \frac{dv}{dr}$$



Difusividade de momento

em que $\mu = \nu \cdot \rho$

Quantidade de momento = m. v

Lei de Newton (se μ constante com dv/dx)

τ_y – shear stress on the fluid (N/m^2)
 μ - absolute viscosity ($kg/m.s$)
 ρ - density (kg/m^3)
 v - momentum diffusivity (m^2/s)
 v – fluid velocity (m/s)

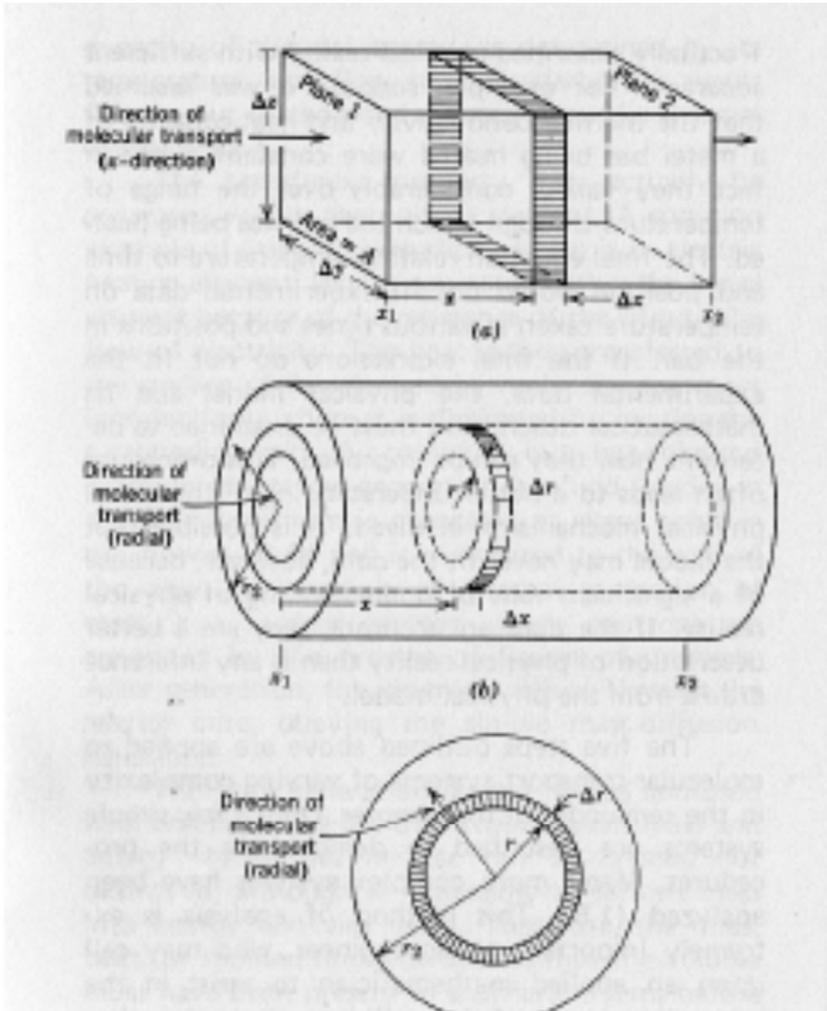


Figure 10.1. Simple geometries. (a) Flat slab: Transport area = A (constant); volume of element = $A\Delta x$. (b) Cylinder: transport area at radius $r = 2\pi r(x_2 - x_1)$; volume of element = $2\pi r \Delta r \Delta x$. (c) Sphere: transport area at radius $r = 4\pi r^2$; volume of element = $4\pi r^2 \Delta r$.

$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dx}$$

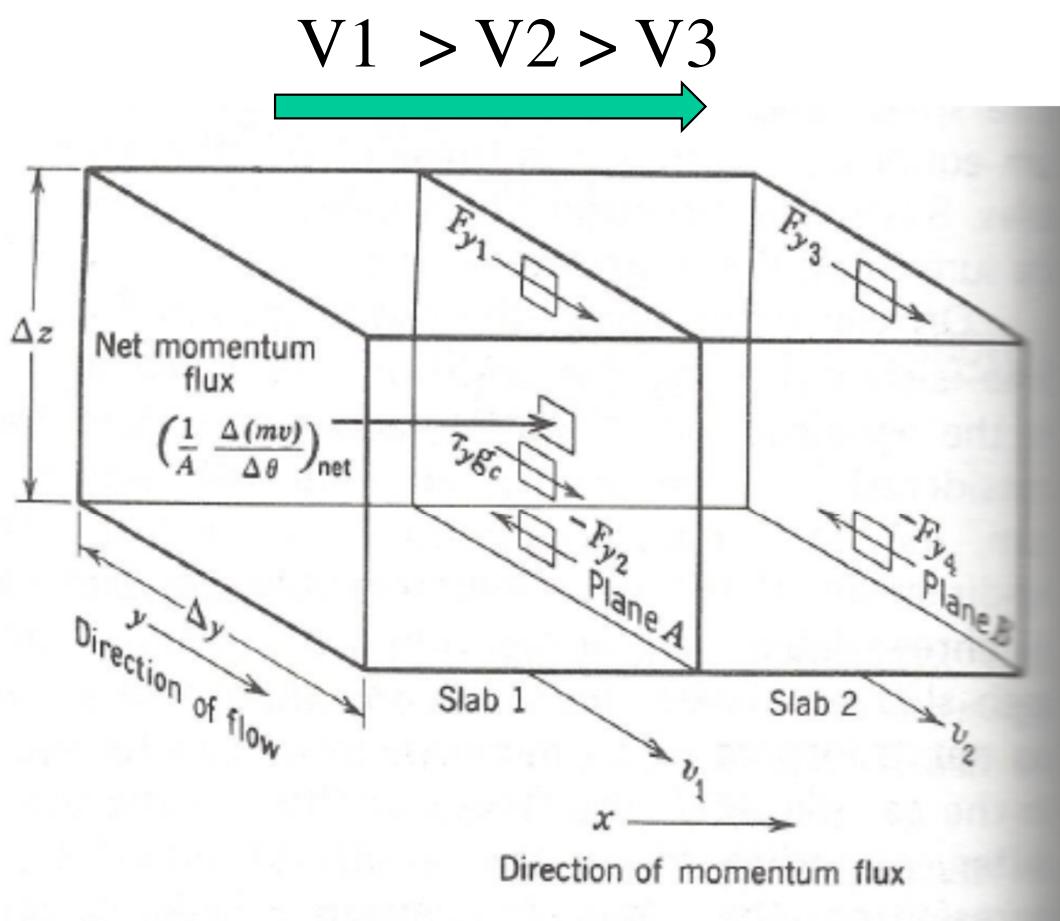
$$\Psi = -\delta \frac{d\Gamma}{dr}$$

[1]

Transporte de momento:

$$\tau_y = -\nu \frac{d(\rho v)}{dx} = -\mu \frac{d(v)}{dx}$$

O fluxo de momento não pode ser medido directamente mas pode ser relacionado com a força ou a tensão de corte que actua no fluido que circula



- Movimento segundo y: Vy
- Gradiente de Vy \rightarrow Transporte de momento segundo x
- Moléculas que da fatia 1 que contactam com a fatia 2, têm que ser desaceleradas para que o excesso de momento se possa distribuir pela fatia 2
- Exercem força sobre fatia 2 na direção y (F_{y1}) no plano entre as fatias (plano A)
- Moléculas que da fatia 2 que contactam com a fatia 1 têm que ser aceleradas
- Exercem força sobre fatia 1 na direção -y ($-F_{y2}$) no plano entre as fatias
- Cada uma destas forças, que actua numa superfície do plano A é chamada **força de corte**, pois tende a deformar o fluido

Fluido: Substância que se deforma continuamente sob a acção de uma tensão de corte

Forças que actuam num fluido podem ser divididas em:

- **Forças físicas** (= body forces): actuam sem contacto físico
ex: gravidade e forças electrostáticas

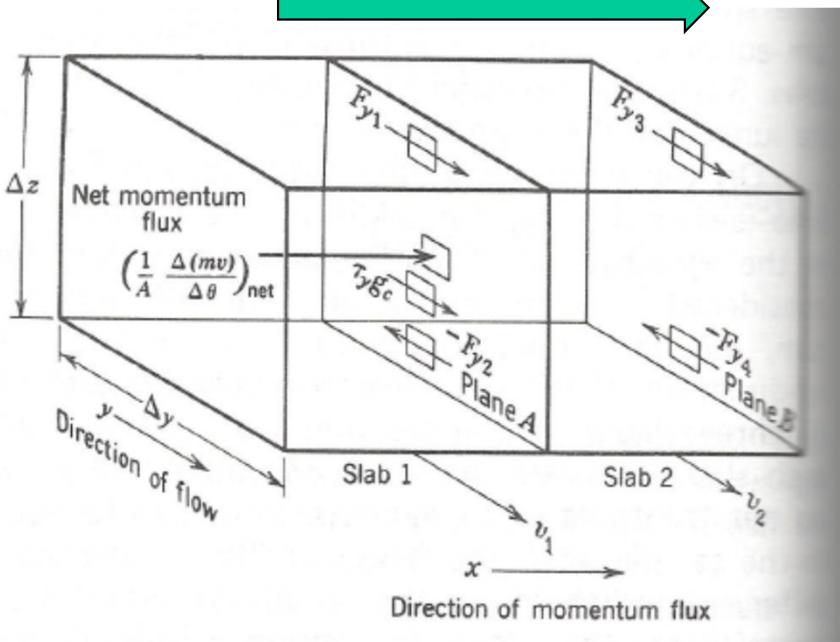
$$F = m \cdot g$$

- **Forças de superfície**: actuam com contacto físico e é necessária uma superfície de contacto para a acção destas forças
ex: pressão e tensão

$$P = \frac{F}{A} \quad F = P \cdot A$$

O fluxo de momento não pode ser medido directamente mas pode ser relacionado com a força ou a tensão de corte que actua no fluido que circula

$$V_1 > V_2 > V_3$$



- F_{y1} actua no plano A (força de superfície) é uma **força de corte**, pois tende a deformar o fluido, e provoca a aceleração da fatia 2 (**transferência de momento**)
 - Por unidade de área: $\frac{F_y}{\Delta z \Delta y} = \tau_y$
- tensão de corte**
- A tensão de corte (segundo y) que as moléculas exercem sobre a fatia de fluido adjacente (plano A) e que a acelera é igual ao fluxo de quantidade de movimento (segundo x)
 - A tensão de corte é tangente à velocidade e origina um fluxo de quantidade de movimento perpendicular à velocidade
- taxa de deformação**

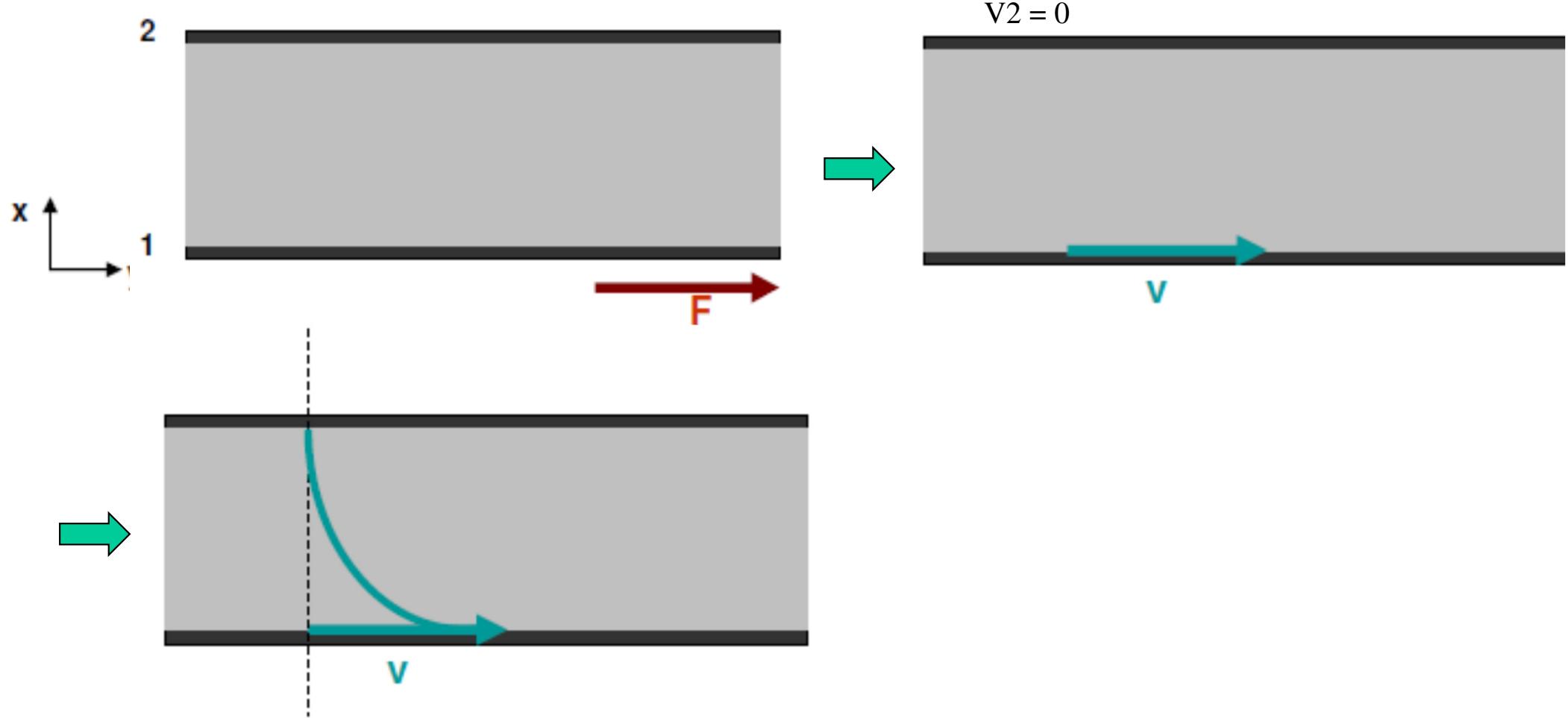
$$\tau_y = -\nu \frac{d(\rho v)}{dx} = -\mu \frac{dv}{dx}$$

em que $\mu = \nu \cdot \rho$

Viscosidade: propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao corte.

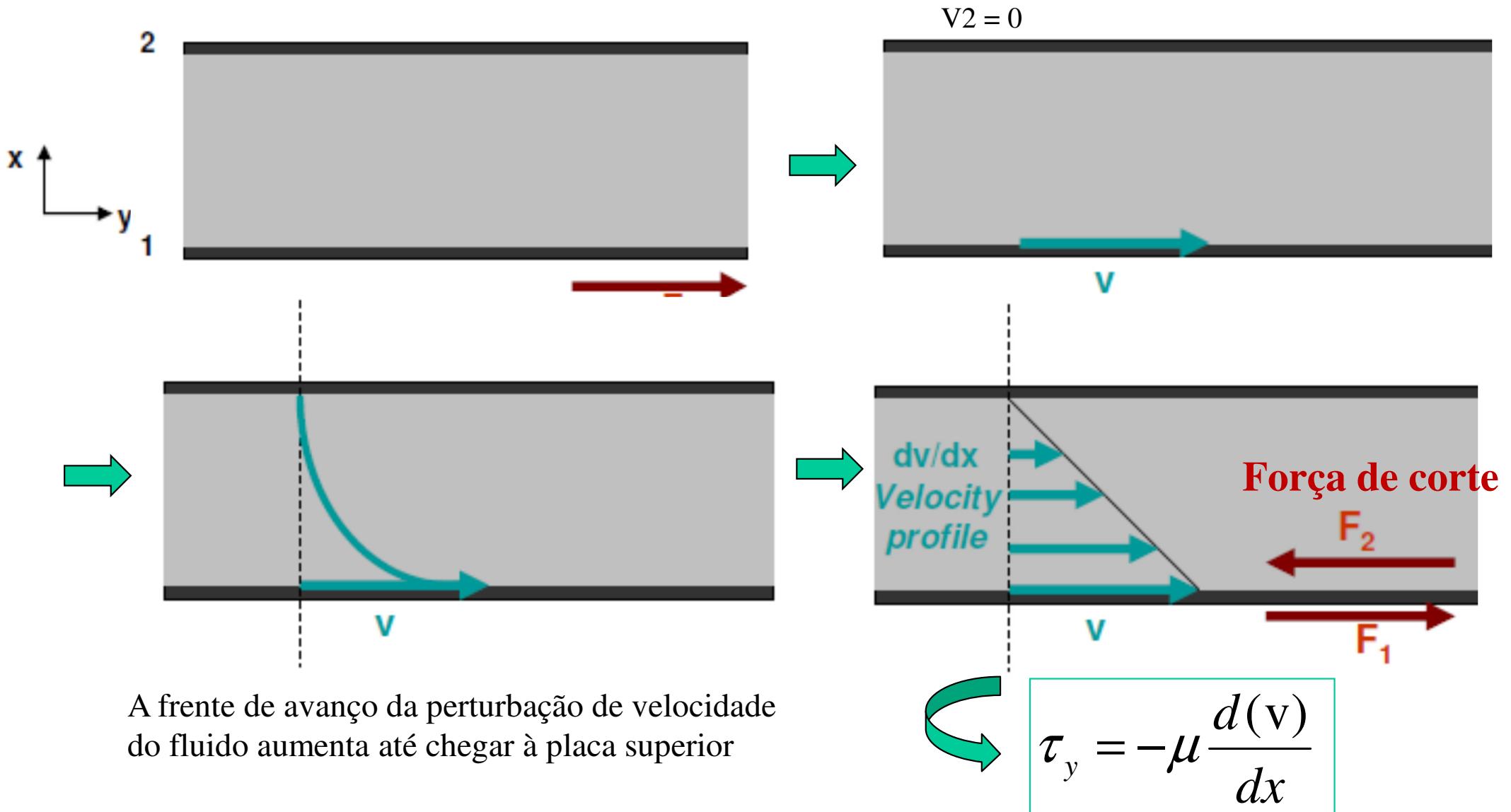
É a medida da resistência do fluido à fluênciia quando sobre ele actua uma força exterior. A viscosidade opõe-se à mudança de forma.

Transporte de momento por mecanismo molecular



- 1 – fluido em repouso entre 2 placas
- 2- a placa inferior move-se e transmite energia ao fluido
- 3- a frente de avanço da perturbação de velocidade do fluido aumenta até chegar à placa superior
- 4- gera-se um gradiente de velocidade
- 5- O fluido exerce sobre a placa 1 uma força retardadora e a placa também exerce uma força sobre o fluido (de aceleração).
- 6- a primeira camada de fluido tem a mesma velocidade da superfície sólida (placa 1) com que contacta

Transporte de momento por mecanismo molecular



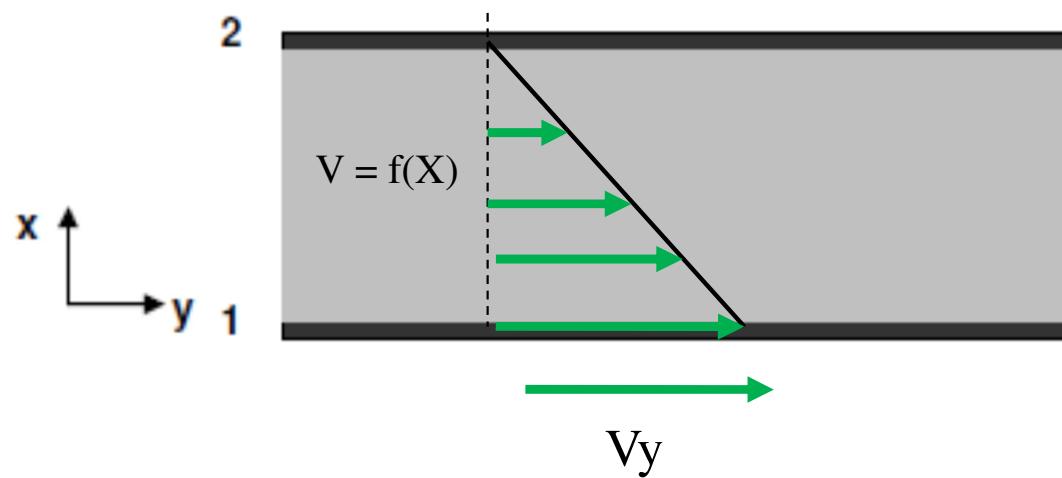
A frente de avanço da perturbação de velocidade do fluido aumenta até chegar à placa superior

A tensão de corte (segundo y) que a placa exerce sobre a “lâmina” de fluido adjacente e que a acelera é igual ao fluxo de quantidade de movimento (segundo x)

2.1

Qual é a tensão tangencial que se deve aplicar a uma placa plana móvel que se encontra separada 1 mm de outra placa plana fixa, para que ela se movimente a uma velocidade de 0,5m/s, sabendo que entre as 2 existe água a 20 °C?

Se a placa tiver 1m de comprimento e 1,5 m de largura, qual o valor da força aplicada?



2-2- Considere duas placas planas paralelas que estão separadas entre si de 5.1 cm. Uma delas movimenta-se a 5.1 cm s^{-1} e a outra, no sentido oposto a 17.8 cm s^{-1} . A viscosidade (η) do fluido entre elas é constante e vale $363 \text{ lb ft}^{-1}\text{h}^{-1}$.

- Calcular a tensão de corte (t) em cada placa.
- Calcular a velocidade do fluido em intervalos de 1.3 cm duma placa à outra.
- Determinar a tensão de corte e os perfis de velocidade se o fluido não for newtoniano, mas sim um plástico de Bingham com:

$$\eta = 363 \text{ lb ft}^{-1}\text{h}^{-1}$$

$$t_c = 0,4792 \text{ Kg m}^{-1}\text{s}^{-2}$$

$$\tau_y = -\mu \frac{dv}{dx}$$

taxa de deformação

Viscosidade: É a medida da resistência do fluido à fluênciia quando sobre ele actua uma força exterior. A viscosidade opõe-se à mudança de forma. Quanto maior a viscosidade de um líquido (ou de uma solução) mais difícil é o líquido fluir e dizemos que é um fluido “viscoso”.



A viscosidade é uma propriedade inerente do líquido devido à sua relação profunda com as forças intermoleculares. Quanto maiores estas forças, mais as moléculas permanecem unidas, não as permitindo fluir com facilidade.

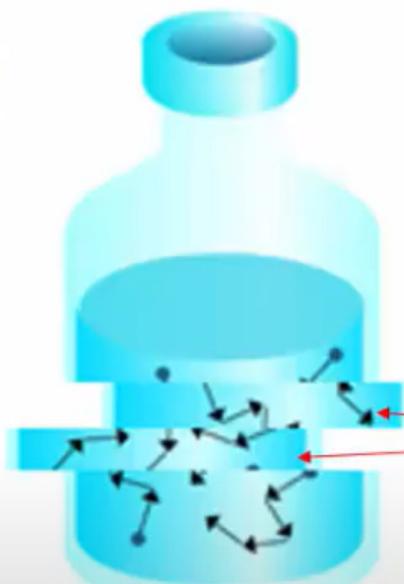
Por exemplo, a água tem maior viscosidade que o benzeno. As forças intermoleculares que atuam na água são basicamente as ligações de hidrogénio, que é a forma mais forte entre as forças intermoleculares. Desta forma, para que as moléculas de água possam fluir, elas precisam de vencer estas fortes interações, quebrando-as.

Viscosity			
Fluid	Temperature (°C)	η (mPa·s)	
Gases			
Air	0	0.0171	
Air	20	0.0181	Methanol
	40	0.0190	Oil (heavy machine)
	100	0.0218	Oil (motor, SAE 10)
	20	0.00974	Oil (olive)
Ammonia	20	0.00974	Glycerin
Carbon dioxide	20	0.0147	Honey
Helium	20	0.0196	Maple Syrup
Hydrogen	0	0.0090	Milk
Mercury	20	0.0450	Oil (Corn)
Oxygen	20	0.0203	
Steam	100	0.0130	
Liquids			
Water	0	1.792	
	20	1.002	
	37	0.6947	
	40	0.653	
Whole blood ^[1]	100	0.282	
	20	3.015	
	37	2.084	
	20	1.810	
Blood plasma ^[2]	37	1.257	
	20	1.20	
Ethyl alcohol	20	1.20	

Nas condições ambientais usuais, a viscosidade dos líquidos diminui com a temperatura...



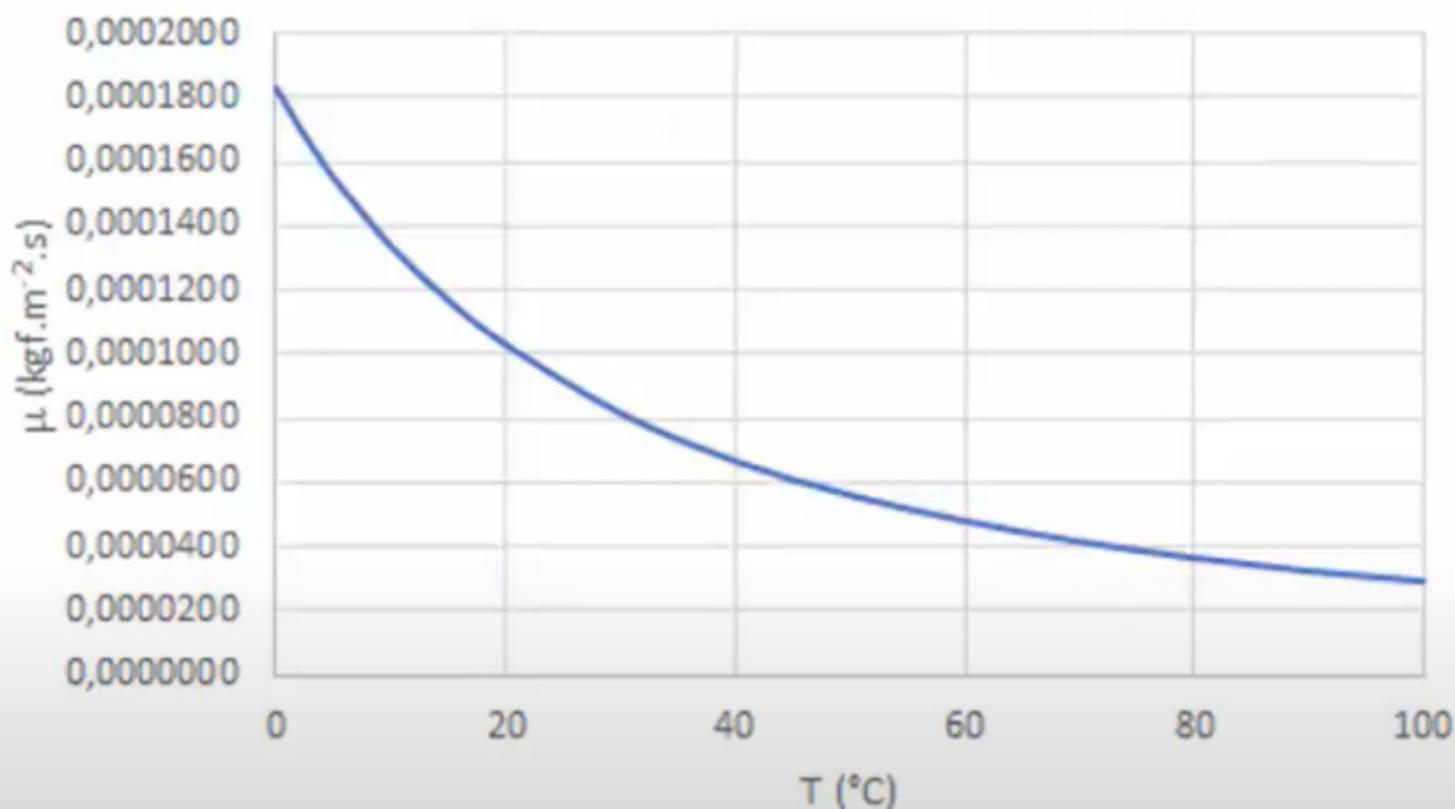
Aumento de temperatura



A viscosidade geralmente diminui com o aumento de temperatura, uma vez que, em altas temperaturas, as moléculas possuem maior energia de translação e rotação, permitindo vencer as barreiras energéticas de interações intermoleculares com maior facilidade.

Mais fácil será movimentar duas camadas do líquido, uma em relação à outra.

Viscosidade absoluta da água x temperatura



...enquanto que, nos gases, acontece o contrário



temperatura



viscosidade

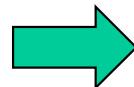


$$\tau_y = -\mu \frac{dv}{dx}$$

taxa de deformação

Viscosidade: É a medida da resistência do fluido à fluênciia quando sobre ele actua uma força exterior. A viscosidade opõe-se à mudança de forma. Quanto maior a viscosidade de um líquido (ou de uma solução) mais difícil é o líquido fluir e dizemos que é um fluido “viscoso”.

Quando a tensão de corte (τ) é directamente proporcional à taxa de deformação (dv/dx)



A constante de proporcionalidade é a viscosidade dinâmica do fluido: μ
Fluido newtoniano (segue a lei de newton)

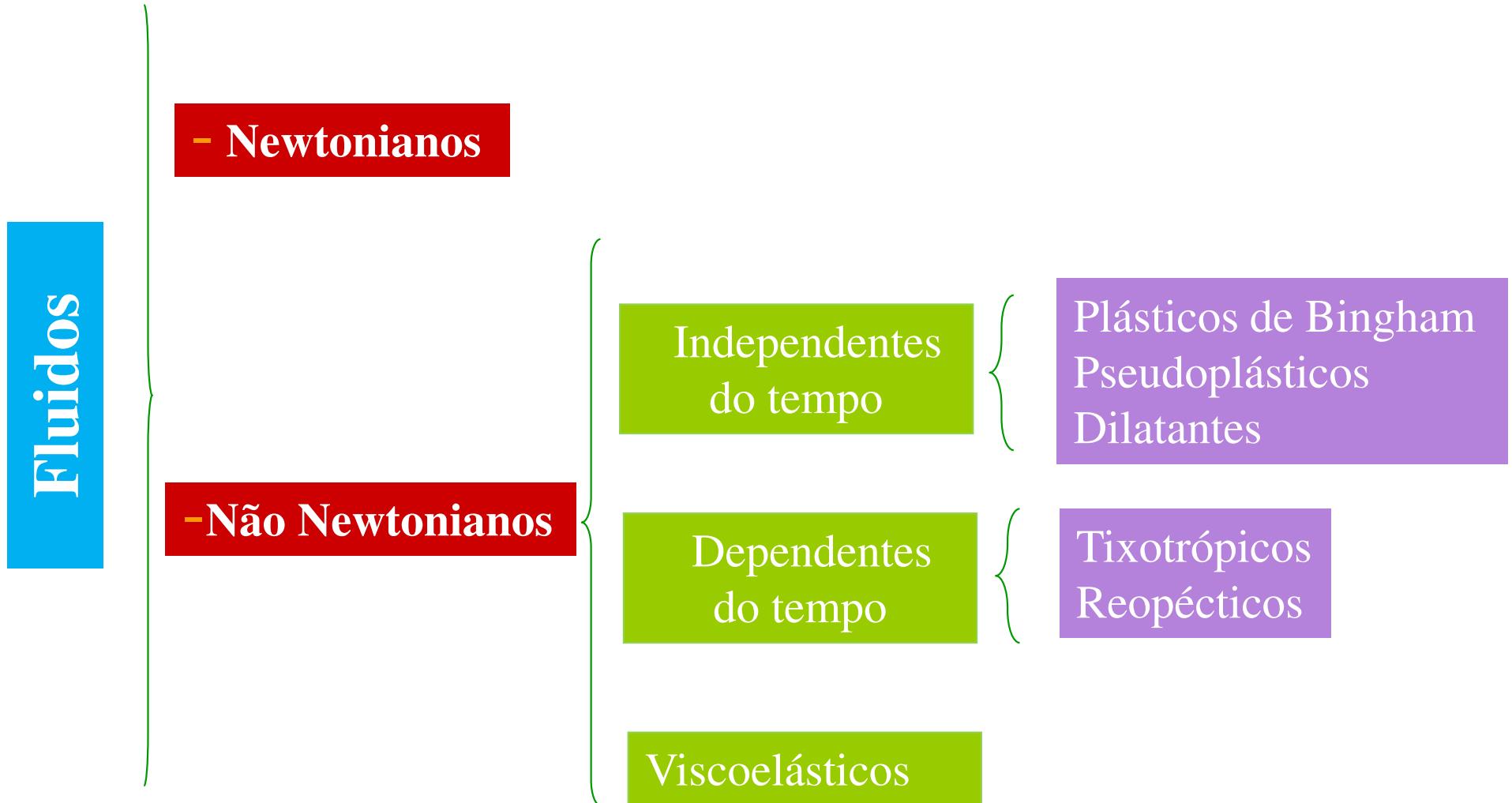
Fluidos não newtonianos: μ varia com dv/dx (velocidade de corte) ou com o tempo de aplicação

O estudo da deformação/ escoamento de um “corpo” (sólido, líquido ou gasoso) quando submetido a um *stress* (tensão) – **REOLOGIA**

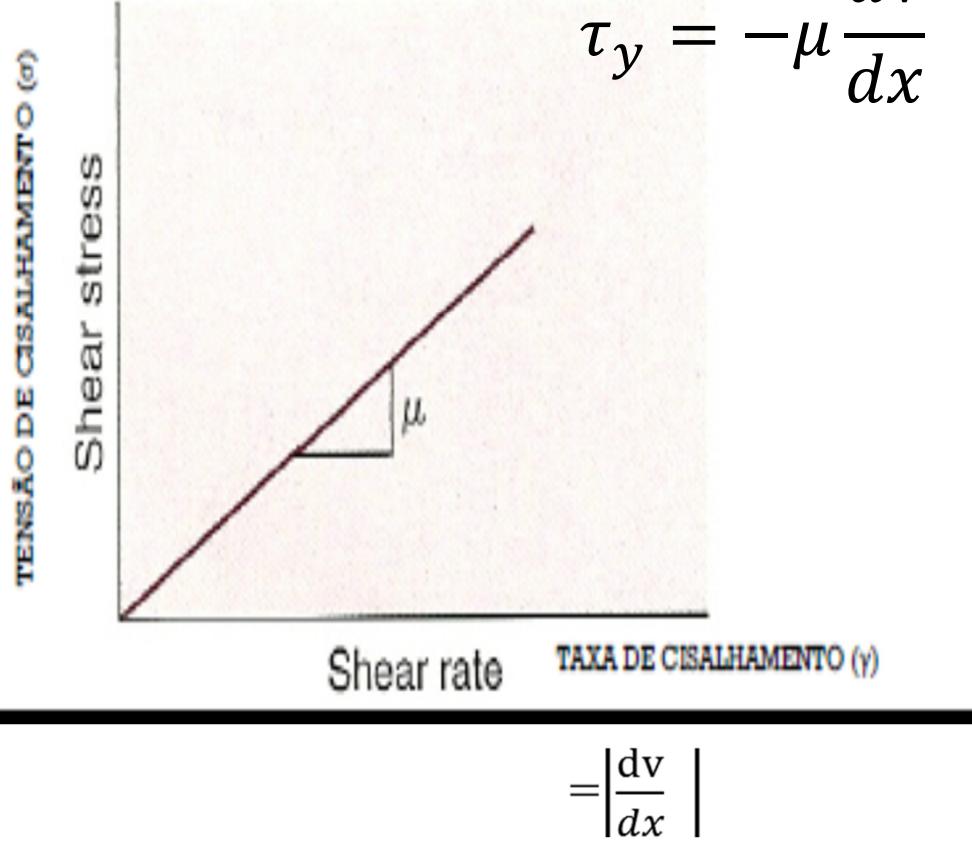
surgiu em 1929 - Marcus Reimer e Eugene Bingham

ORIGEM: GRÉCIA
RHEO = ESCOAMENTO
LOGOS = CIÊNCIA

Classificação dos Fluidos



Fluidos newtonianos (seguem a lei de newton, ie, μ é constante com dv/dx e tempo)

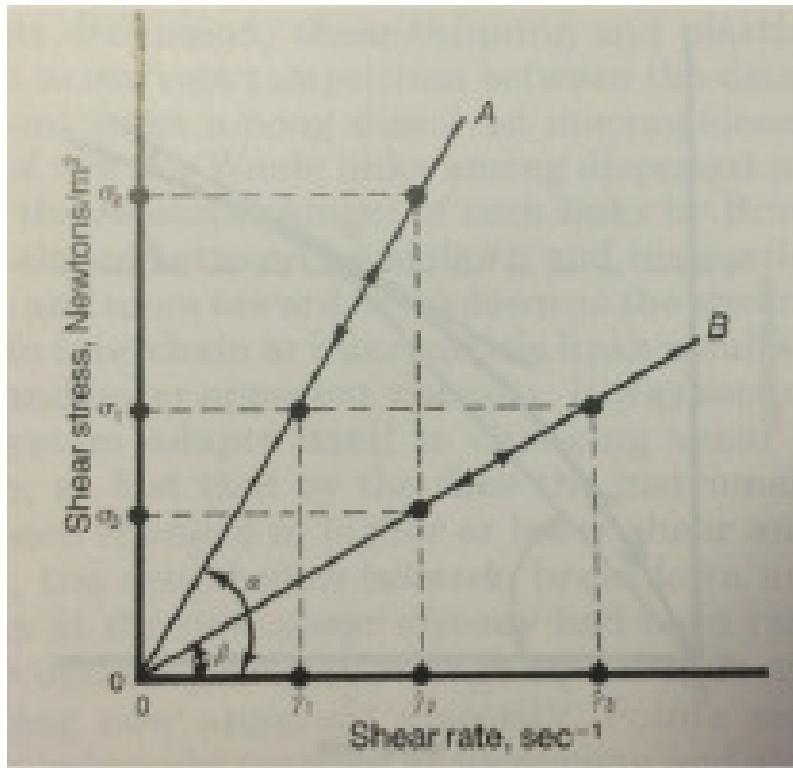


- Proporção directa entre tensão de cisalhamento ou de corte (τ) e taxa de cisalhamento ou deformação (dv/dx)
- Viscosidade constante com a taxa de deformação em escoamento laminar
- μ é a constante de proporcionalidade denominada viscosidade dinâmica do fluido

$$\frac{\tau_y}{\left| \frac{d(v)}{dx} \right|} = \mu$$

ex: água, etanol, azeite, glicerina, gases e líquidos puros de baixo PM, soluções com substâncias não poliméricas

Comparação de fluidos newtonianos



$$\tau_y = -\mu \frac{d(v)}{dx}$$

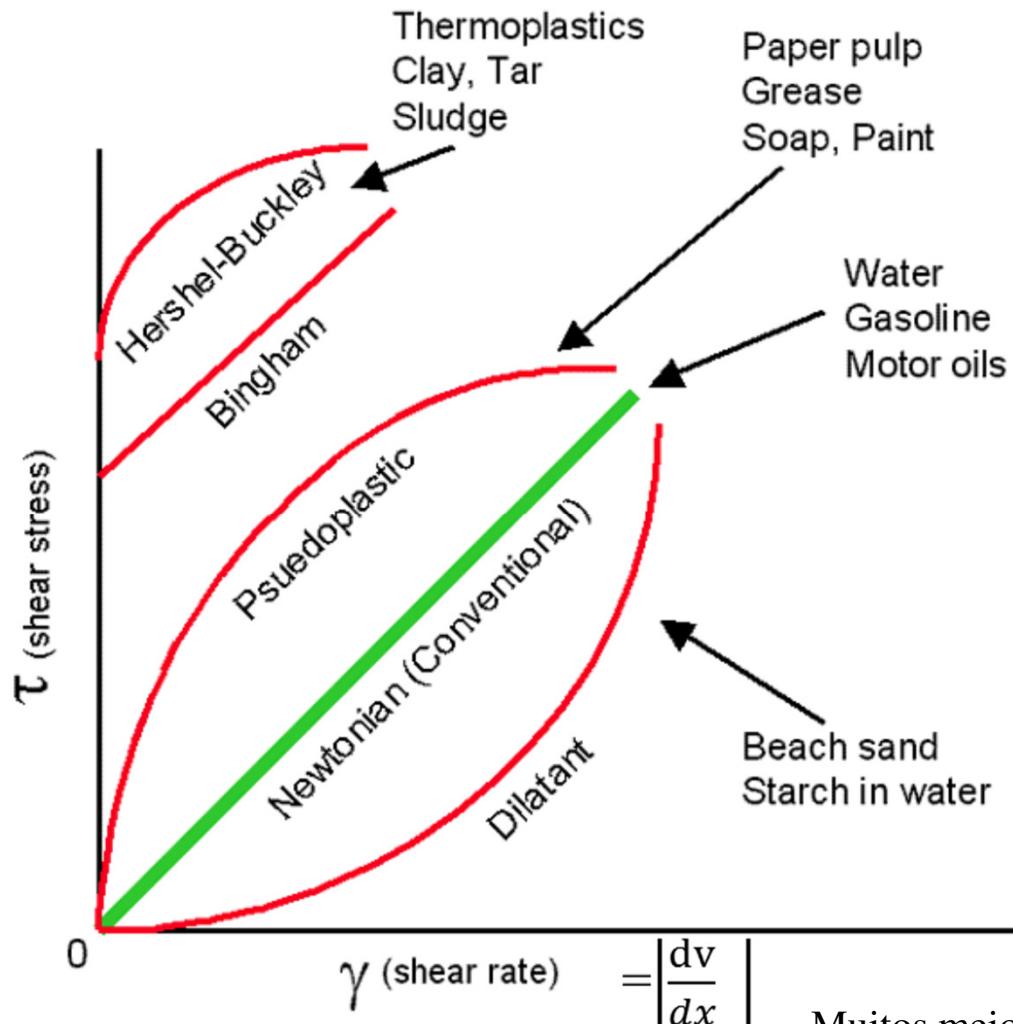
- Quanto maior o declive da recta, maior a **μ do fluido**

Comparação de fluidos Newtonianos:
(A) óleo, (B) água.

Fluidos não newtonianos (μ varia com dv/dx ou tempo)

Combinam características de sólidos com caract. de líquidos

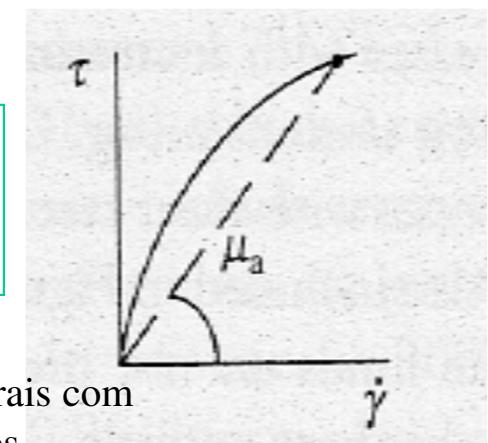
Fluidos não newtonianos: μ varia com dv/dx (velocidade de corte) ou com o tempo de aplicação



$$\frac{\tau_y}{\left| \frac{d(v)}{dx} \right|} = \mu_a$$

ponto a ponto
por analogia define-se viscosidade aparente ou
pseudoviscosidade

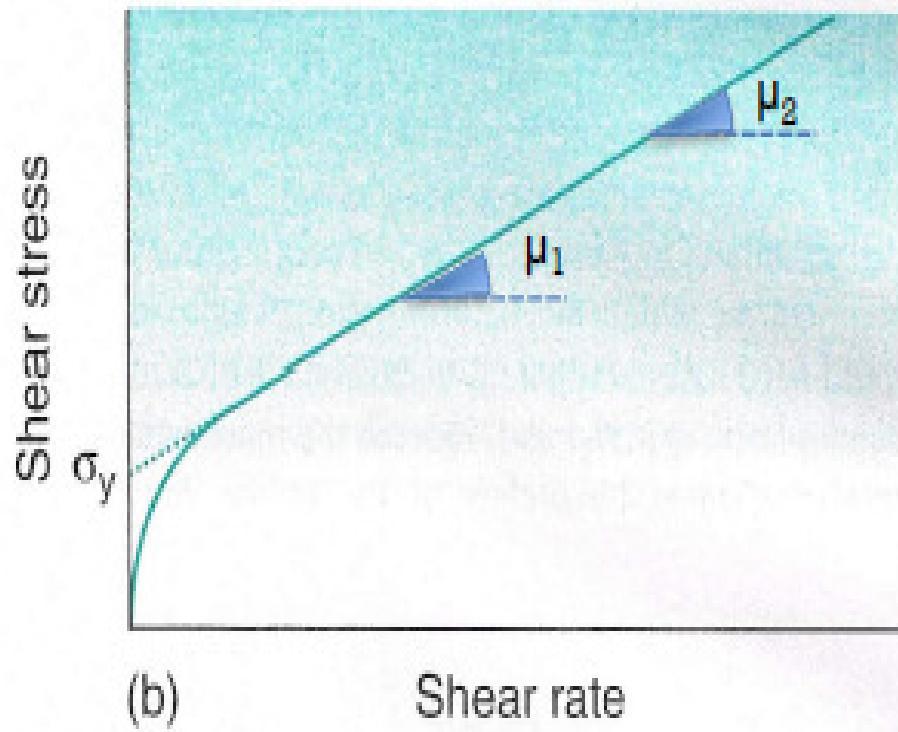
$$\tau_y = -\mu_a \frac{d(v)}{dx}$$



Muitos meios de fermentação envolvem materiais com comportamento não newtoniano, como amidos, polisacáridos extracelulares e caldos fermentativos com células em suspensão.

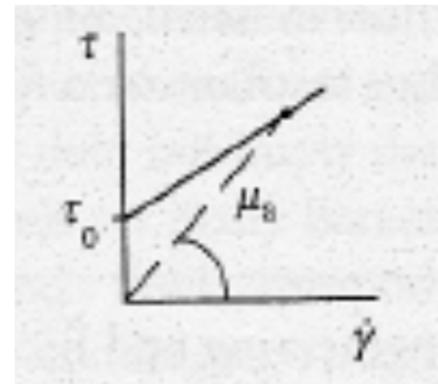
Plásticos de Bingham

- Fluido só começa a deformar e a circular acima da tensão de cedência ou crítica. Até esse valor comporta-se como um sólido.
- Se a tensão de cedência for ultrapassada, o “fluido” comporta-se como um fluido newtoniano.



$$\tau_y = \tau_0 - k \frac{dv}{dx}$$

Tensão de cedência



- Hipótese: possuem redes interpartículas ou intermoleculares que resistem a forças fracas de cisalhamento quando estão em descanso.
- Apresentam relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento uma vez que começam a escoar.

μ_a diminui com aumento da velocidade de corte dv/dx

Ex: pasta de dentes, geléias, suspensões de argilas em água

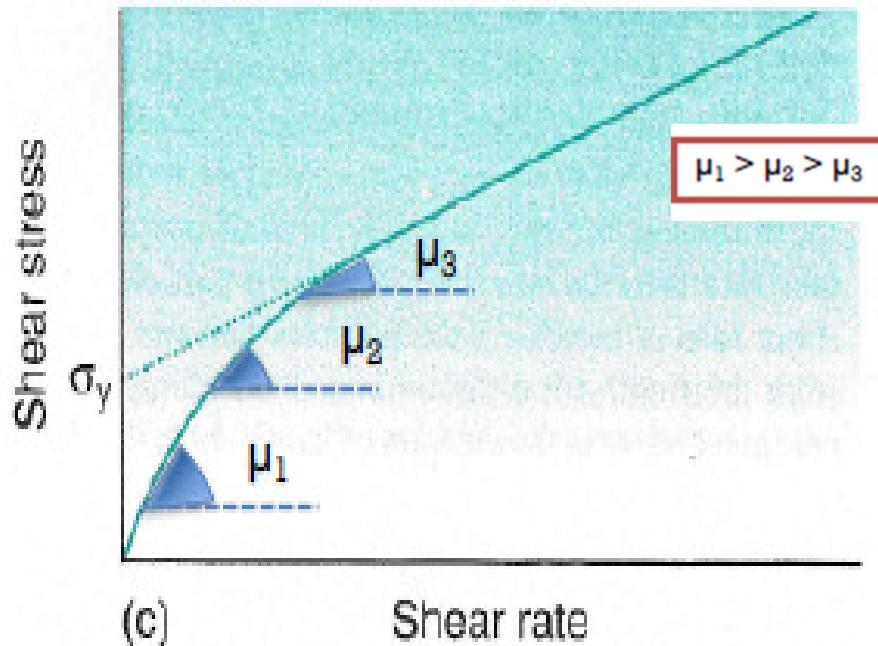
<https://www.youtube.com/watch?v=XV-eo5HmfCA>
2'41''

Fluidos pseudo plásticos

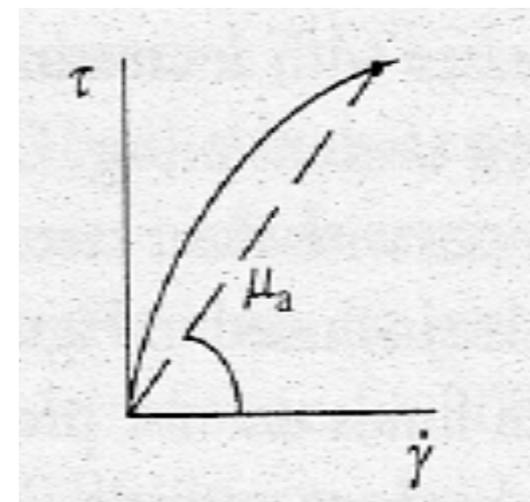
apresentam menor viscosidade quando a tensão de corte sofre aumento

Quando agitados, tornam-se mais fluidos

μ_a diminui com aumento da velocidade de corte dv/dx



$$\tau_y = -k \left(\frac{dv}{dx} \right)^n \quad \text{com } n < 1$$



μ_a diminui com aumento da velocidade de corte dv/dx

■ Explicações possíveis:

- Podem conter partículas microscópicas submersas que podem se orientar na direção do fluxo
- Partículas enoveladas podem se deformar e se elongar na direção do fluxo
- Partículas aglomeradas podem se romper em partículas menores

■ Geralmente são reversíveis

Ex: colas, pomadas, cremes, soluções de polímeros, ketchup, pasta de papel

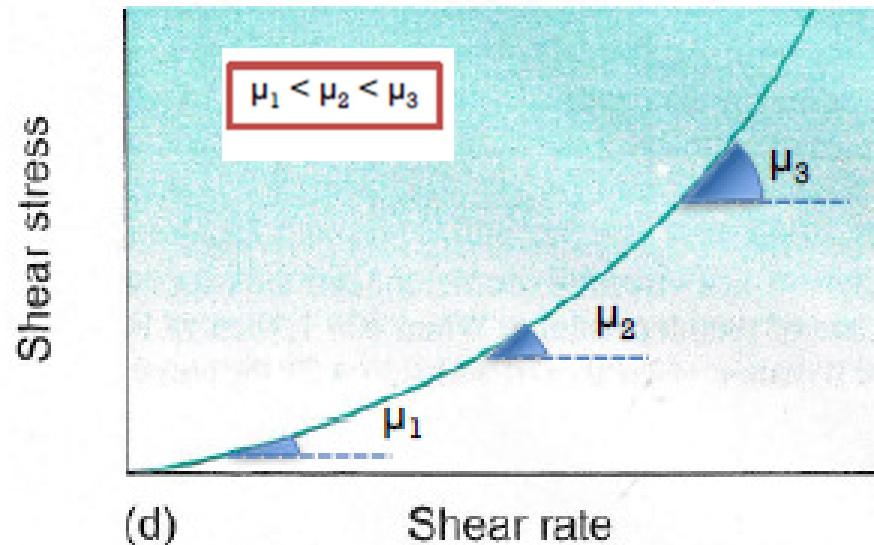
https://www.youtube.com/watch?v=JkJHC_drMh4
22 s

Fluidos dilatantes

apresentam maior viscosidade quando a tensão de corte sofre um aumento

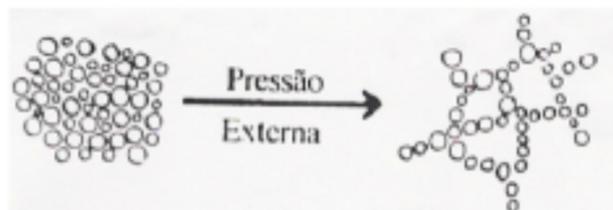
Quando agitados, tornam-se menos fluidos

μ_a aumenta com aumento da velocidade de corte dv/dx

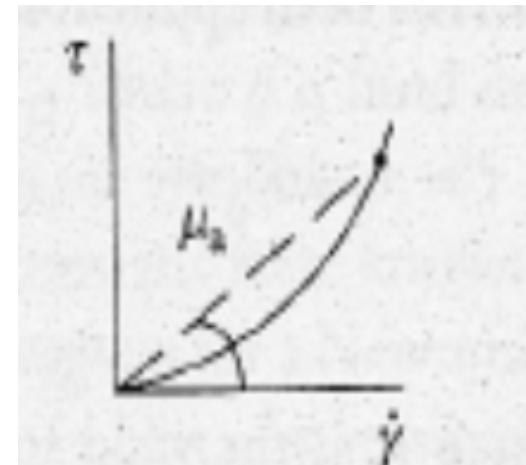


Explicação possível:

Para maiores tensões de corte, as moléculas não conseguem reorganizar-se e aumenta o volume total e a viscosidade aumenta. Por isto são chamados dilatantes



$$\tau_y = -k \left(\frac{dv}{dx} \right)^n \quad \text{com } n > 1$$



Ex: suspensões de amido, de silicatos, areia, de goma arábica

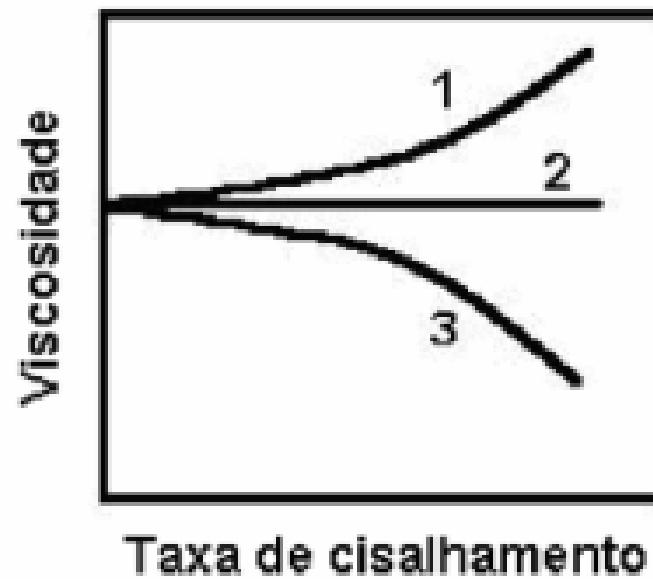
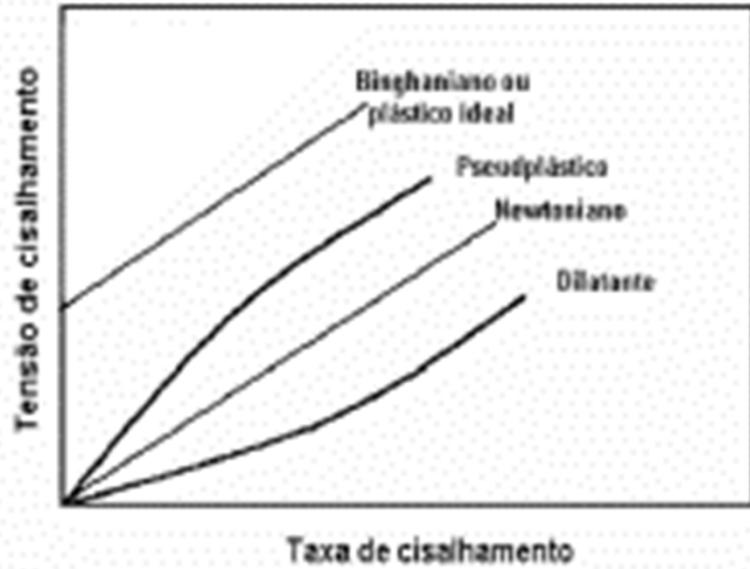
Comum em dispersões aquosas contendo de 40% a 50% de partículas.

https://www.youtube.com/watch?v=EkLsfhzc3_Y
7'6"



FLUIDOS INDEPENDENTES DO TEMPO

Escoam imediatamente em resposta a uma pequena tensão aplicada. Entretanto, sua relação com a deformação não é linear.

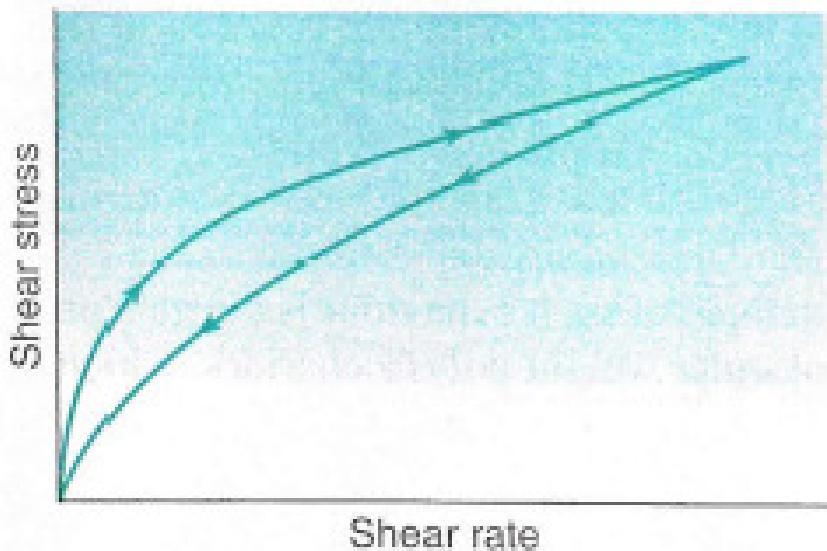


Curvas de fluxo de fluidos:

1 – Dilatante (shear thickening), 2 Newtoniano e 3 - Pseudoplástico (shear thinning).

Fluidos não-newtonianos com comportamento variável no tempo

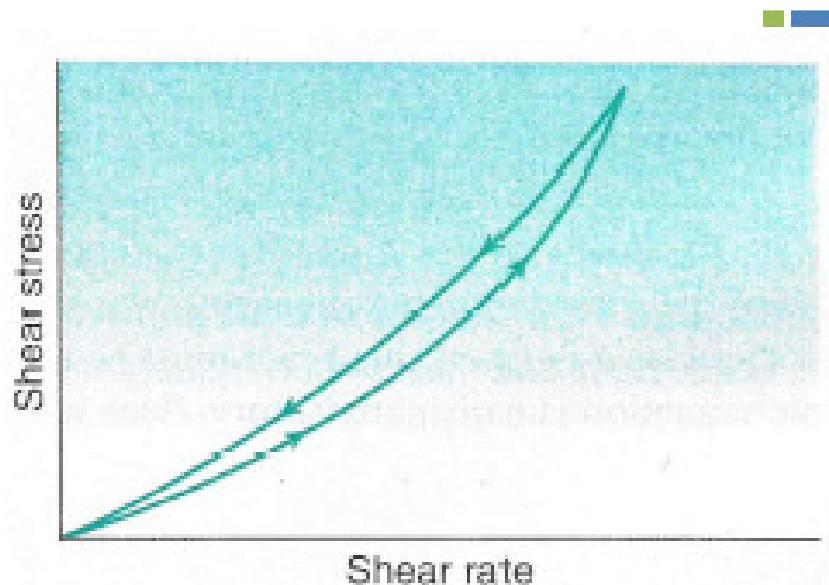
Tixotrópicos: viscosidade aparente diminui com o tempo até atingir um valor mínimo. (Para uma velocidade de corte constante)



Importância tecnológica – polímeros, indústria alimentar, tintas e revestimentos, fluido sinovial articulações), citoplasma de células

Parando a agitação, os fluidos tixotrópicos param de fluir ao fim de algum tempo (comportamento associado com a quiescência ou pausas).

Reopécticos: viscosidade aparente aumenta com o tempo até atingir um valor máximo. (Para uma velocidade de corte constante)



Importância tecnológica – gesso, suspensões de bentonite,

- Muita dificuldade em formular relações quantitativas entre tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e tempo: a reologia é uma ciência ainda em evolução

Fluidos não-newtonianos

Viscoelásticos: Produtos semissólidos que apresentam propriedades de fluidos viscosos e sólidos elásticos ao mesmo tempo

retomam parcialmente à sua forma original quando a tensão aplicada é interrompida (ex. sistemas poliméricos, massa do pão, algumas almofadas) (Para uma velocidade de corte constante)

