

## Mecânica de Fluidos

FBT0530 - FÍSICA INDUSTRIAL  
PROFA. DRA. JULIANA RACT  
PROFA. DRA. MARINA ISHII

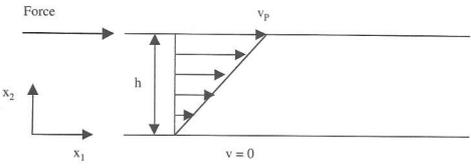
## + INTRODUÇÃO À REOLOGIA

- Ciência que:
  - surgiu em 1929 - Marcus Reimer e Eugene Bingham
  - ramo de estudo da mecânica de fluidos
  - estuda a deformação/ escoamento de um "corpo" (sólido, líquido ou gasoso) quando submetido a um stress (tensão)

**ORIGEM: GRÉCIA**  
**RHEO = ESCOAMENTO**  
**LOGOS = CIÊNCIA**

## + FLUIDOS

### Força x Deformação



- avalia como um material responde quando submetido à uma força ou tensão de cisalhamento

## + DEFORMAÇÃO

- A deformação que resulta da aplicação desta força pode ser dividida em dois tipos
- Deformações elásticas ou reversíveis
- Deformações permanentes ou irreversíveis

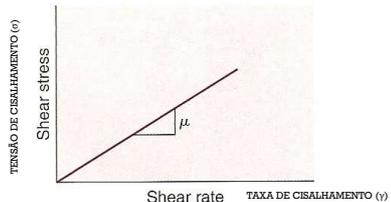
## + CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS

FLUIDOS

- NEWTONIANOS
- NÃO NEWTONIANOS

## + FLUIDOS NEWTONIANOS

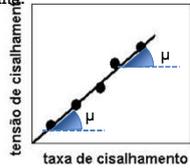
- Proporção direta entre Tensão de Cisalhamento ( $\sigma$ ) e Taxa de Cisalhamento ( $\gamma$ )
- Viscosidade constante no escoamento laminar
- onde  $\mu$  é a constante de proporcionalidade denominada **VISCOSIDADE**



## + FLUIDOS NEWTONIANOS

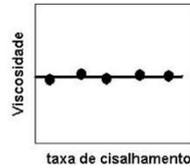
Líquidos puros ou soluções com substâncias não poliméricas.

Ex.: água, clorofórmio, etanol, óleo de oliva, óleo de ricino, glicerina.



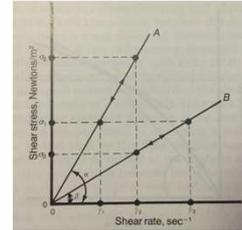
CURVA DE ESCOAMENTO

(REOGRAMA)



CURVA DE VISCOSIDADE

## + COMPARAÇÃO DE FLUIDOS NEWTONIANOS



Comparação de fluidos Newtonianos:

(A) óleo, (B) água.

Quanto maior a inclinação do gráfico tensão x taxa de cisalhamento, maior será a viscosidade do material.

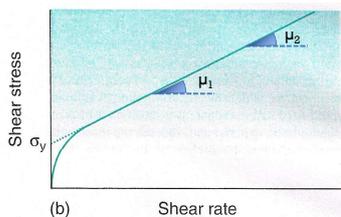
## + FLUIDOS NÃO-NEWTONIANOS

- Alguns fluidos podem ser líquidos em determinadas temperaturas e sólidos em outras
  - Sorvetes, gorduras
- Alguns são constituídos por sólidos suspensos em uma matriz líquida
  - Purês, papinhas de bebê, sopas, molhos prontos para salada
- Alguns contêm gotículas de um líquido dispersas em outro líquido imiscível
  - Emulsões, como o leite, cremes e loções

## + CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS



## + PLÁSTICOS OU CORPOS DE BINGHAM



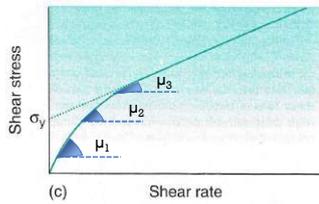
$$\mu_1 = \mu_2$$

Para que este fluido escoe, é necessário aplicar uma força mínima  $\sigma_y$ , e depois o comportamento segue como de um fluido newtoniano. Abaixo deste valor, o fluido comporta-se como sólido.

## + PLÁSTICOS DE BINGHAM

- Ex.: pasta de dente, catchup, geléias, suco concentrado de laranja
- Necessitam da aplicação de uma **tensão inicial** (yield stress) para começar a escoar.
- 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.
- Não fluem até que a tensão aplicada seja maior que a tensão inicial. Comportam-se como sólidos elásticos até então e não se espalham quando colocados em uma superfície plana em resposta à força da gravidade.

## + PSEUDOPLÁSTICOS



$$\mu_1 > \mu_2 > \mu_3$$

Não é necessário aplicar uma força mínima para o escoamento e a viscosidade do fluido diminui conforme aumenta a taxa de cisalhamento.

Comum em dispersões aquosas de hidrocolóides. As moléculas longas e de elevado peso molecular quando aplicada uma tensão se organizam no sentido do escoamento, oferecendo menor resistência a ele, liberando moléculas de água.

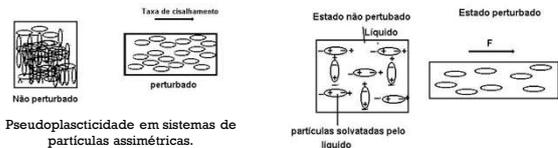
## + FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS OU SHEAR THINNING

- Leite condensado, purês de algumas frutas, maionese, mostarda, sopas de vegetais
- Quando agitados em um recipiente, tornam-se mais “fluidos”
- Quando agitados com um agitador em alta intensidade, sua viscosidade diminui, o que pode auxiliar no processo de mistura

## + FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS OU SHEAR THINNING

- Explicações possíveis:
  - Podem conter partículas microscópicas submersas que podem se orientar na direção do fluxo
  - Partículas enoveladas podem se deformar e se alongar na direção do fluxo
  - Partículas aglomeradas podem se romper em partículas menores
- Geralmente são reversíveis

## + FLUIDOS PSEUDOPLÁSTICOS OU SHEAR THINNING



Pseudoplasticidade em sistemas de partículas assimétricas.

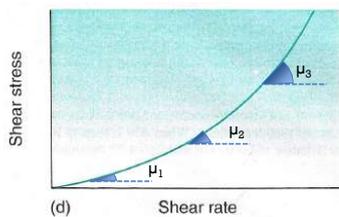
partículas solvatadas pelo líquido

Esquema ilustrativo da diminuição de viscosidade causada pelo aumento da taxa de cisalhamento (destruição da camada solvatada).

Redução da viscosidade de sistemas poliméricos devido ao aumento da tensão de cisalhamento.

<https://www.youtube.com/watch?v=DQoelY18qfw>

## + DILATANTES



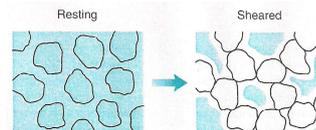
$$\mu_1 < \mu_2 < \mu_3$$

Comportamento contrário ao fluido pseudoplástico, a viscosidade aumenta com o aumento da taxa de cisalhamento.

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

## + DILATANTES

Quando a tensão é zero, as partículas estão “próximas e empacotadas” e o espaço entre elas é mínimo, sendo o líquido suficiente para preenchê-lo.



Conforme a tensão de cisalhamento aumenta, as partículas se organizam de forma a criar grandes espaços, por onde o veículo sai e a resistência ao escoamento e a viscosidade aumentam.

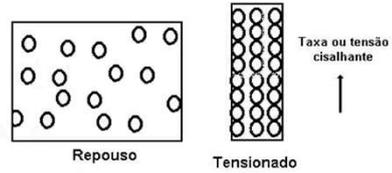
Dilatância pode ser um problema no processamento de dispersões ou na granulação de massas de comprimidos onde usam-se moinhos de alta velocidade e misturadores.

## + FLUIDOS DILATANTES OU SHEAR THICKENING

- Ex.: suspensões de amido, soluções de farinha de milho e açúcar, silicato de potássio e areia
- A maioria destes fluidos são suspensões, contendo partículas sólidas em estado desordenado
- Em baixas deformações, a fase líquida age como lubrificante e a suspensão flui quase como um fluido newtoniano
- Conforme a deformação aumenta, as partículas sólidas começam a se separar, formando "redes" e aumentando o volume total. Por isto são chamados dilatantes.



## + FLUIDOS DILATANTES (SHEAR THICKENING)

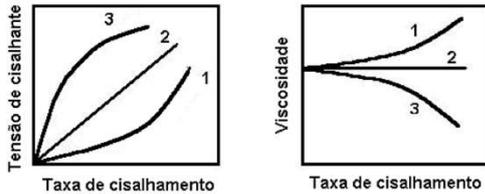


Hipótese de Reynolds para a dilatância: o aumento da taxa de cisalhamento acarreta aproximação das partículas, resultando no aumento da resistência ao fluxo

<https://www.youtube.com/watch?v=IE3TYpWPmo>

## + FLUIDOS INDEPENDENTES DO TEMPO

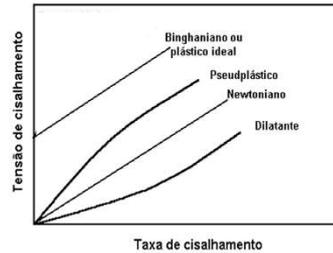
Escoam imediatamente em resposta a uma pequena tensão aplicada. Entretanto, sua relação com a deformação não é linear.



Curvas de fluxo de fluidos:

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

## + REOGRAMAS DOS TIPOS DE FLUIDOS



[https://www.youtube.com/watch?v=KB43BM\\_ozKQ](https://www.youtube.com/watch?v=KB43BM_ozKQ)

## + CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS

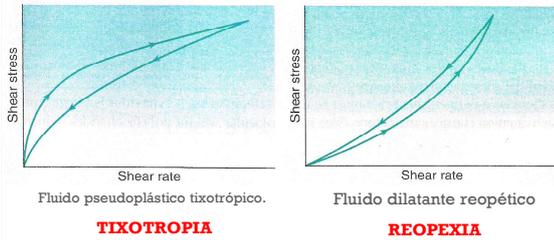


## + FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS DEPENDENTES DO TEMPO

- Viscosidade varia em função do tempo a uma dada taxa de cisalhamento
  - Tixotrópicos: Viscosidade diminui
  - Reopéticos: Viscosidade aumenta
- Tanto a tixotropia como a reopexia são atribuídas a mudanças contínuas na estrutura do material, que podem ser reversíveis ou irreversíveis.
  - Tixotropia <-> Pseudoplasticidade
  - Reopexia <-> Dilatância

+

## TIXOTROPIA E REOPEXIA



+

## FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS DEPENDENTES DO TEMPO

- Muita dificuldade em formular relações quantitativas entre tensão de cisalhamento, taxa de cisalhamento e tempo: a reologia é uma ciência ainda em evolução
- Ex. fluidos tixotrópicos: bentonita.
- Ex. fluidos reopéticos: gesso.

+

## FLUIDOS VISCOELÁSTICOS

- Produtos semissólidos que apresentam propriedades de fluidos viscosos e sólidos elásticos ao mesmo tempo
- Só ocorrem em sistemas poliméricos (plásticos, tintas, gomas, muscilagens),
- Importante para estabelecer condições de armazenamento

+

## APLICAÇÕES NA ÁREA FARMACÊUTICA

- quando da elaboração de uma formulação;
- facilidade para escoar de um frasco ou sair de um tubo e manter seu formato, passagem através de uma agulha de injeção;
- espalhabilidade sobre a pele;
- cremes, pastas, supositórios e revestimento de comprimidos;
- operação de mistura ou bombeamento industrial dentro do processo de produção.

+

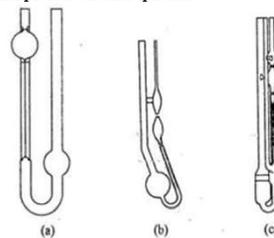
## MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE

- A viscosidade é medida em **viscosímetros**, os quais podem ser classificados em dois grupos de acordo com a medida de:
  - **Taxa de escoamento de líquidos através de tubos capilares**
  - **Taxa ou tensão de cisalhamento de líquidos movendo-se entre**
    - placas planas paralelas
    - disco
    - cone-disco
    - cilindro rotativo

+

## MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE

- **Viscosímetros capilares**
  - A velocidade do escoamento é medida sob a influência da gravidade ou de uma pressão externa aplicada.



(a) Ostwald;

(b) Cannon-Fenske

(c) Ubbelohde

## + MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE

### ■ Viscosímetro de Stokes (esfera)

- A viscosidade é medida pela velocidade de queda de uma esfera dentro de um líquido colocado em um tubo vertical de vidro. É medido o tempo que uma esfera gasta para percorrer o espaço entre duas marcas feitas no viscosímetro.



## + MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE

- **Viscosímetro de orifício (copo-Ford):** A viscosidade é medida pelo tempo que um volume fixo de líquido gasta para escoar através de um orifício existente no fundo de um recipiente.

- O copo Ford é fornecido com um conjunto de orifícios-padrão (giglê) feitos de bronze polido.
- O orifícios de número 2, 3 e 4 são utilizados para medir líquidos de baixa viscosidade, na faixa de 20 a 310 centistokes;
- os de número 5, 6, 7 e 8 para líquidos de viscosidade superior a 310 cst.

- <https://www.youtube.com/watch?v=sYjghwPXeiM>



## + MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE

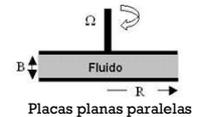
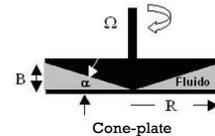
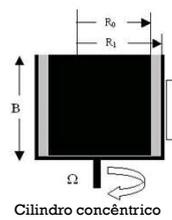
### ■ Viscosímetro rotacional

- Velocidade de rotação de eixos metálicos imersos no líquido (Brookfield)
- Medição do torque requerido para rodar um fuso imerso em um dado fluido
- A resistência ao movimento rotacional de uma haste (spindle) é proporcional à viscosidade

Cada spindle é apropriado para medir a viscosidade de fluidos em uma faixa específica: os de menor diâmetro, as maiores viscosidades; os de maior diâmetro, as menores viscosidades.



## + MEDIÇÕES DE VISCOSIDADE



[http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Nivel\\_Viscosidade](http://www.fem.unicamp.br/~instmed/Nivel_Viscosidade)