

FENÔMENOS DE TRANSPORTE AULA 3**VISCOSIDADE**

A viscosidade dinâmica ou absoluta μ :

- mede a resistência à deformação;
- resulta de forças internas de atrito entre as diferentes camadas de fluidos;
- resulta de forças coesivas entre moléculas (líquido) e colisões moleculares (gases/vapores).

Para:

- gases: aumenta com a temperatura.
- líquidos: diminui com a temperatura.

Unidades:

Da “Lei” de Newton:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy}$$

Usando-se o Sistema Internacional de Unidades:

$$\frac{N}{m^2} = [\mu] \frac{m/s}{m}$$

Obtém-se, assim que a unidade de viscosidade é:

$$[\mu] = \frac{N}{m^2} \cdot s = Pa \cdot s = \frac{kg}{m \cdot s}$$

No sistema CGS:

$$[\mu] = \frac{g}{cm \cdot s} = P \text{ (Poise)}$$

A unidade usual para a viscosidade é o centiPoise: cP = 10^{-2} P.

As correspondências são:

$$1N \cdot s/m^2 = 1kg/m \cdot s = 1Pa \cdot s = 0,020885lbf \cdot s/ft^2 = 10P = 10g/cm \cdot s$$

A influência da pressão é pequena tanto para líquidos quanto para gases/vapores.

Pode-se estabelecer uma relação entre a viscosidade dinâmica μ e a densidade ρ de um fluido:

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

Em que ν é a viscosidade cinemática do fluido. A unidade da viscosidade cinemática é:

-no SI: m^2/s

-no CGS: $cm^2/s = \text{stoke}$

$$1\text{stoke} = 0,0001m^2/s$$

Exemplo:

Ar:

A 20°C e 1atm: viscosidade dinâmica $\mu = 1,83 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ e a viscosidade cinemática $\nu = 1,52 \times 10^{-5} m^2/s$.

FENÔMENOS DE TRANSPORTE I

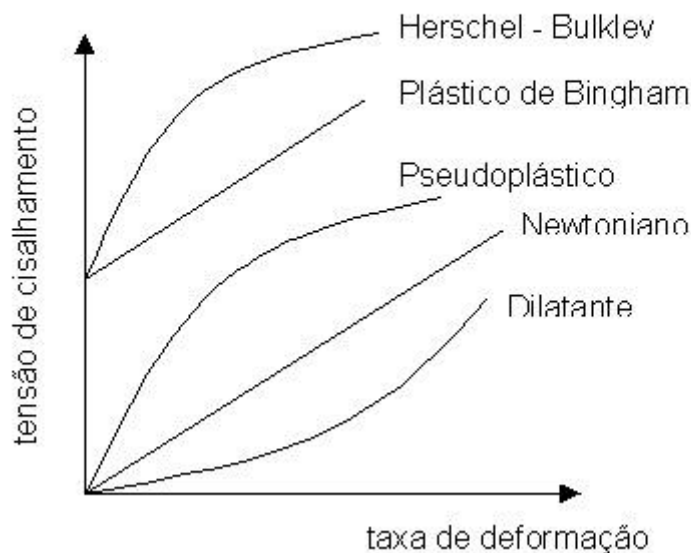
A 20°C e 4atm: viscosidade dinâmica $\mu = 1,83 \times 10^{-5} \text{Pa.s}$ e a viscosidade cinemática $\nu = 0,380 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$.

PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS FLUIDOS

A reologia é a área da física que estuda o escoamento e a deformação da matéria. Ela descreve a deformação de sólidos, líquidos e gases sob a influência de tensões. De toda a área de estudo da reologia, talvez o conceito mais utilizado seja o de viscosidade, que pode ser entendida como a resistência de um fluido a qualquer mudança irreversível de seus elementos de volume com a aplicação de uma tensão. Alguns produtos possuem uma única viscosidade a uma dada temperatura independente da força de cisalhamento aplicada, mas não são todos os fluidos.

Tensão de cisalhamento e taxa de deformação devem estar relacionadas. A partir dessa relação, os fluidos são classificados em função desse comportamento reológico.

Curva de escoamento de fluidos newtonianos e não newtonianos de propriedades independentes do tempo de cisalhamento.



Fluidos Newtonianos independentes do tempo:

Fluido Newtoniano: o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação é uma reta que passa pela origem.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} = \mu \dot{\gamma}$$

Esta é a lei da viscosidade de Newton. Gases, soluções reais de líquidos não coloidais são exemplos de fluidos newtonianos.

Fluidos Plásticos de Bingham: só escoam após um dada tensão de cisalhamento inicial, τ_0 . Depois apresentam um comportamento linear. Este tipo de fluido apresenta uma

FENÔMENOS DE TRANSPORTE I

relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação, a partir do momento em que se atinge uma tensão de cisalhamento inicial.

Seguem o modelo:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}$$

k é a chamada viscosidade plástica (Pa.s, no SI)

τ_0 é tensão de cisalhamento residual.

Apresentam este comportamento: pasta de dente, suspensão de argilas em água, fluidos de perfuração de poços de petróleo, algumas suspensões de sólidos granulares.

Uma variante deste comportamento são os fluidos ditos Plásticos Generalizados ou Fluidos de Hershel Bulkley. Também chamado de Bingham generalizado. Este tipo de fluido também necessita de uma tensão inicial para começar a escoar. Entretanto, a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação não é linear.

Seguem o modelo:

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n$$

k é o índice de consistência (Pa.sⁿ) e n é o índice de comportamento do fluido (adimensional).

Fluidos Pseudoplásticos: São substâncias que, em repouso, apresentam suas moléculas em um estado desordenado, e quando submetidas a uma tensão de cisalhamento, suas moléculas tendem a se orientar na direção da força aplicada. E quanto maior esta força, maior será a ordenação e, conseqüentemente, menor será a viscosidade aparente.

Seguem a Lei de potências ou Lei de Ostwald-de-Waele:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

k é o índice de consistência (Pa.sⁿ) e n é o índice de comportamento do fluido (adimensional).

Outra forma dessa expressão é:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1} \frac{dv}{dy} = \eta \frac{dv}{dy}$$

em que η é a viscosidade aparente do fluido.

A diferença da viscosidade aparente com a viscosidade dinâmica é que a viscosidade dinâmica depende da temperatura e a viscosidade aparente depende da temperatura e da taxa de deformação. A viscosidade aparente diminui com o aumento da velocidade. O parâmetro $n < 1,0$.

Ex.: polpa de frutas, caldos de fermentação, melaço de cana, solução de polímeros, suspensões coloidais de partículas assimétricas, polpa de papel em água.

Fluidos Dilatantes: São substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No uso de suspensões, à medida que se aumenta a tensão de cisalhamento, o líquido intersticial que lubrifica a fricção entre as partículas é incapaz de preencher os espaços devido a um aumento de volume que frequentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente. Também seguem o modelo da Lei de Potências:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

Neste caso, $n > 1,0$.

Exemplos: suspensões de amido, soluções de farinha de milho e açúcar, silicato de potássio e areia.

A Lei de Potências pode então ser apresentada da seguinte forma:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

- se $n = 1,0$: fluido newtoniano;
- se $n < 1,0$: fluido pseudoplástico;
- se $n > 1,0$: fluido dilatante.

Um tratamento possível da Lei de Potências consiste na sua linearização:

$$\ln(\tau) = \ln(k) + n \cdot \ln\left(\frac{dv}{dy}\right)$$

Um gráfico de $\ln(\tau)$ X $\ln(dv/dy)$ fornece uma reta para fluidos newtoniano, pseudoplástico e dilatante com o coeficiente angular igual a n e o coeficiente linear igual a $\ln(k)$.

- se $n = 1,0$: fluido newtoniano e $\ln(k) = \ln(\mu)$;
- se $n < 1,0$: fluido pseudoplástico;
- se $n > 1,0$: fluido dilatante.

FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS DEPENDENTES DO TEMPO

Os fluidos que possuem este tipo de comportamento apresentam propriedades que variam, além da tensão de cisalhamento, com o tempo de aplicação desta tensão, para uma velocidade de cisalhamento constante.

A) Fluidos Tixotrópicos: Esta classe de fluidos tem sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos com quando esta cessa.

Tixotropia: Fluidos tixotrópicos são aqueles caracterizados pela diminuição da viscosidade aparente do líquido com o tempo de aplicação a uma dada taxa de deformação. Este fenômeno é isotérmico e reversível sendo consequência da destruição gradual da “estrutura” construída pelas partículas da fase dispersa, cuja força de ligação

FENÔMENOS DE TRANSPORTE I

não resiste à ação do cisalhamento imposto. Após a retirada da força cisalhante, o sistema volta à sua conformação original, recuperando novamente a sua viscosidade aparente inicial. Para estes materiais, qualquer que seja a taxa de cisalhamento aplicado, existirá um tempo necessário para a viscosidade cair e depois manter-se constante. O tempo necessário para que a viscosidade aparente se mantenha constante é denominado de “tempo de estabilização” (T_e), e este é dependente da taxa de cisalhamento imposta ao fluido. Importante: Todo fluido tixotrópico é pseudoplástico, mas nem todo fluido pseudoplástico é tixotrópico.

Ex.: suspensões concentradas, emulsões, soluções proteicas, petróleo cru, tintas, ketchup.

B) Fluidos Reopéticos: Já este tipo de fluido apresenta um comportamento inverso ao dos tixotrópicos. Desta forma, a viscosidade destes fluidos aumenta com o tempo de aplicação da tensão, retornando à viscosidade inicial quando esta força cessa.

Reopexia: Os fluidos que apresentam comportamento oposto aos fluidos tixotrópicos são denominados de Reopéticos. Estes fluidos apresentam um aumento da viscosidade aparente com o tempo a uma dada taxa de cisalhamento.

Ex.: argila bentonita.



Curvas de escoamento de fluidos não newtonianos de propriedades dependentes do tempo de cisalhamento.

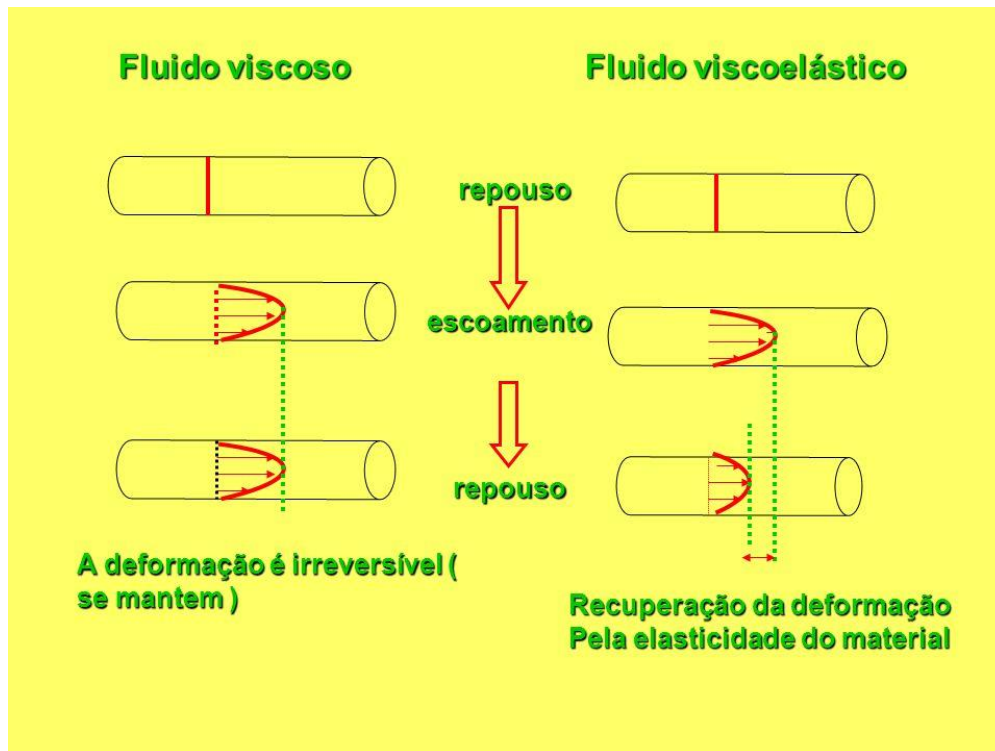
C) Fluidos Viscoelásticos: São fluidos que possuem características de líquidos viscosos com propriedades elásticas (Modelo de Maxwell) e de sólidos com propriedades viscosas (Modelo de Kelvin-Voigt), ou seja, possuem propriedades elásticas e viscosas acopladas. Estas substâncias quando submetidas à tensão de cisalhamento sofrem uma deformação e quando esta cessa, ocorre uma certa recuperação da deformação sofrida (comportamento elástico).

Seguem o modelo:

$$\tau = \frac{\mu}{G} \frac{d\tau}{dt} + \mu \frac{dv}{dy}$$

O termo μ/G é denominado de tempo de relaxação.

Ex.: massas de farinha de trigo, gelatinas, queijos, líquidos poliméricos, glicerina, plasma, biopolímeros, ácido hialurônico, saliva, goma xantana.



EFEITO DA TEMPERATURA NA VISCOSIDADE

Para fluidos newtonianos (líquidos), o efeito da temperatura na viscosidade expressa-se como uma expressão do tipo Arrhenius:

$$\mu = \mu_0 \exp \left[\frac{E_A}{RT} \right]$$

em que:

E_A é a energia de ativação (J/mol),

μ_0 é a viscosidade a uma deformação infinita,

R é a constante dos gases 8,32 J/mol.K,

T é a temperatura absoluta.

Verifica-se se T aumenta, μ diminui.

Para fluidos não newtonianos:

$$\tau = k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

FENÔMENOS DE TRANSPORTE I

que é a lei de potências. O termo k comporta-se da mesma forma que μ . O termo n não é afetado pela temperatura.

Para fluidos plásticos de Bingham, o aumento da temperatura faz com que a tensão de cisalhamento residual, τ_0 , diminua.

EFEITO DA CONCENTRAÇÃO NA VISCOSIDADE

Normalmente, maiores concentrações de um soluto aumentam o valor da viscosidade ou do índice de consistência do fluido. Há dois modelos típicos:

$$y = K_1 C^{A_1}$$

$$y = K_2 \exp(A_2 C)$$

C é a concentração de soluto; y pode ser μ ou k ; A_1 e A_2 são constantes características.

EFEITO DA TEMPERATURA E DA CONCENTRAÇÃO NA VISCOSIDADE

Há dois modelos possíveis:

$$\mu = \alpha_1 (C)^{\beta_1} \exp[E_A/RT] \text{ modelo de potências}$$

$$\mu = \alpha_2 \exp[\beta_2 C + E_A/RT] \text{ modelo exponencial}$$

μ pode ser a viscosidade dinâmica ou a aparente; α_i e β_i são parâmetros característicos; C a concentração e T é a temperatura.