

ÍNDICE

| | |
|--|----------|
| 1. DEFINIÇÕES | 1 |
| 2. DEFORMAÇÃO E GRADIENTE DE VELOCIDADE | 1 |
| 3. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA | 3 |
| 3.1 FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS INDEPENDENTES DO TEMPO | 4 |
| 3.2 FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS DEPENDENTES DO TEMPO..... | 6 |
| 3.3 VISCOELÁSTICOS..... | 7 |
| 4. OUTROS MODELOS..... | 8 |
| 4.1 MODELO DE PRANDTL-EYRING..... | 8 |
| 4.2 MODELO DE ELLIS | 8 |
| 4.3 MODELO DE REINER-PHILIPPOFF | 8 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 9 |

1. DEFINIÇÕES

REOLOGIA

É o estudo do comportamento deformacional e do fluxo de matéria submetido a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas ao longo de um intervalo de tempo. Inclui propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

VISCOSIDADE

É a medida da resistência interna ou fricção interna de uma substância ao fluxo quando submetida a uma tensão. Quanto mais viscosa a massa, mais difícil de escoar e maior o seu coeficiente de viscosidade.

Um fluido é uma substância que se deforma continuamente quando sujeito à ação de uma força. Os fluidos reais (líquidos, gases, sólidos fluidizados) apresentam uma resistência à deformação ou ao escoamento quando submetidos a uma determinada tensão. Para os gases, a viscosidade está relacionada com a transferência de impulso devido à agitação molecular. Já a viscosidade dos líquidos relaciona-se mais com as forças de coesão entre as moléculas.

VISCOELASTICIDADE

Os líquidos viscosos não possuem forma geométrica definida e escoam irreversivelmente quando submetidos a forças externas. Por outro lado, os sólidos elásticos apresentam forma geométrica bem definida e se deformados pela ação de forças externas, assumem outra forma geométrica de equilíbrio. Muitos materiais apresentam um comportamento mecânico intermediário entre estes dois extremos, evidenciando tanto características viscosas como elásticas e, por este motivo, são conhecidos como viscoelásticos.

2. DEFORMAÇÃO E GRADIENTE DE VELOCIDADE

Considere um fluido contido entre duas placas planas paralelas, de área A , separadas por uma distância y . Uma força \vec{F} é aplicada na parte superior, movimentando a placa a uma velocidade \vec{u} constante em relação à placa inferior, que é mantida fixa, conforme mostra a Figura 1.

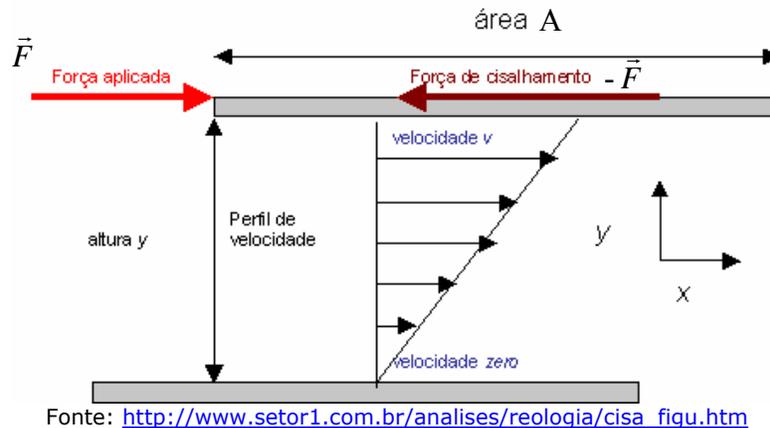


Figura 1: Força de cisalhamento aplicada sobre um fluido.

Esta força \vec{F} dá origem a uma força de mesma intensidade, porém em sentido contrário, a força de cisalhamento, que existe somente devido às forças de coesão do fluido com as paredes da placa e entre as camadas de fluido, em caso de regime laminar. A força de cisalhamento dá origem a um gradiente de velocidade $\frac{du_x}{dy}$ entre as placas.

Supondo que não haja deslizamento do fluido nas paredes das placas, a velocidade do fluido será igual a zero na placa inferior e igual a u na placa superior.

A **Lei de Newton da Viscosidade** diz que a relação entre a tensão de cisalhamento (força de cisalhamento \times área) e o gradiente local de velocidade é definida através de uma relação linear, sendo a constante de proporcionalidade, a viscosidade do fluido. Assim, todos os fluidos que seguem este comportamento são denominados **fluidos newtonianos**.

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{du_x}{dy} \quad (2.1)$$

Na qual:

τ_{yx} é a tensão de cisalhamento na direção x , g/cm.s^2 ;

$\frac{du_x}{dy}$ é o gradiente de velocidade ou taxa de cisalhamento, s^{-1} ;

μ é a viscosidade, $\text{cP} = 10^{-2} \text{g/cm.s} = 0,001 \text{kg/m.s} = 10^{-3} \text{N.s}$

3. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA

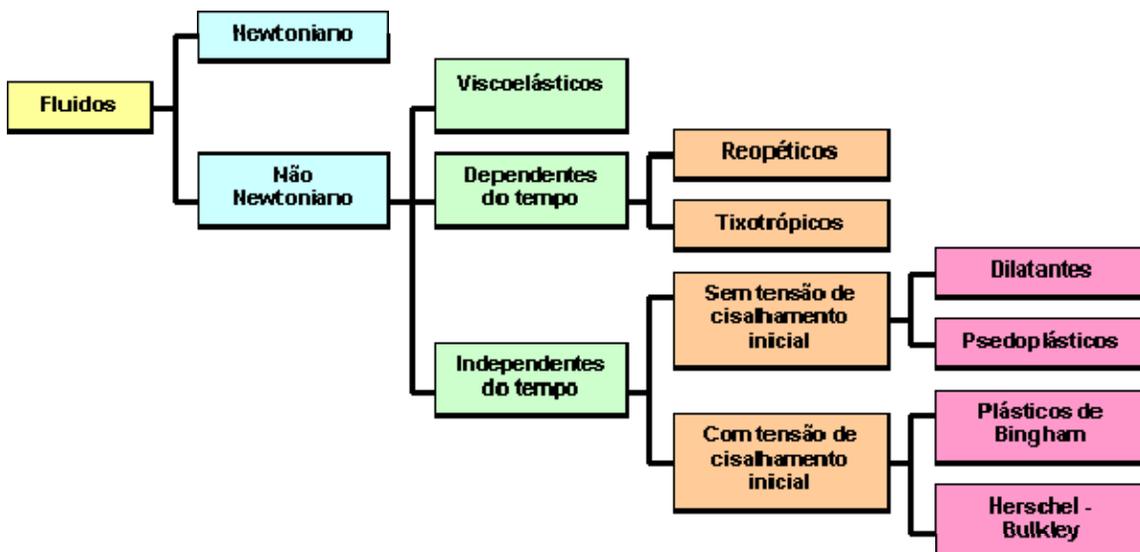
Quanto à deformação, os fluidos podem ser classificados em:

- Reversíveis ou elásticos: são sistemas que não escoam; sua deformação é reversível e o sistema obedece à Lei de Hooke.
- Irreversíveis ou viscosos: são sistemas que escoam; sua deformação é irreversível e o sistema obedece à Lei de Newton, de viscosidade constante.

Também podem ser classificados quanto à relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento:

- Fluidos Newtonianos: sua viscosidade é constante, seguem a Lei de Newton. Esta classe abrange todos os gases e líquidos não poliméricos e homogêneos. Ex.: água, leite, soluções de sacarose, óleos vegetais.
- Fluidos Não Newtonianos: a relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento não é constante.

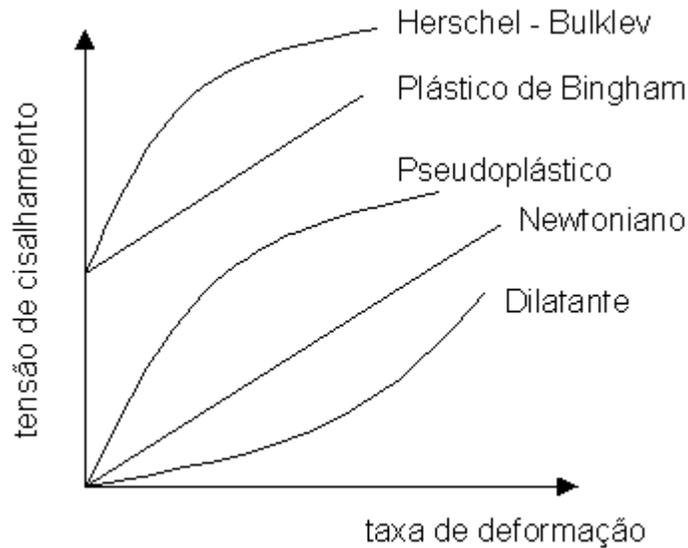
Além disso, os fluidos não newtonianos ainda podem ser classificados em: viscoelásticos, dependentes e independentes do tempo, como podemos ver na Figura 2.



Fonte: http://www.setor1.com.br/analises/reologia/cla_ssi.htm

Figura 2: Classificação dos Fluidos segundo seu comportamento reológico.

A Figura 3 mostra o comportamento reológicos do fluido newtoniano e dos fluidos não newtonianos independentes do tempo e a seguir é dada uma breve descrição sobre cada um deles.



Fonte: http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva_inde.htm

Figura 3: Curvas de escoamento de fluidos newtoniano e não newtonianos de propriedades independentes do tempo de cisalhamento.

3.1 FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS INDEPENDENTES DO TEMPO

São aqueles cujas propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento. São ainda divididos em:

- A) Sem tensão inicial – são aqueles que não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Compreendem a maior parte dos fluidos não newtonianos. Dentro desta classe destacam-se:

- ❖ 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.

Este fluido pode ser descrito pelo Modelo de Ostwald-de-Waele ou Modelo Power Law (1923, 1925), representado pela Equação:

$$\tau_{yx} = -K \left| \frac{du_x}{dy} \right|^{n-1} \frac{du_x}{dy} \quad (3.1)$$

Na qual:

K é o índice de consistência do fluido,

n é a inclinação da curva, neste caso, menor que 1. (A inclinação da curva só atinge o valor da unidade para taxas de deformação muito baixas ou muito altas, e o fluido se torna mais newtoniano.)

Ex.: polpa de frutas, caldos de fermentação, melão de cana.

❖ Dilatantes

São substâncias que apresentam um aumento de viscosidade aparente com a tensão de cisalhamento. No caso 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 freqüentemente acompanha o fenômeno. Ocorre, então, o contato direto entre as partículas sólidas e, conseqüentemente, um aumento da viscosidade aparente.

Também podem ser representados pelo Modelo de Orswado-de-Waele ou Modelo Power Law (Eq. 3.1). No entanto, para este caso, n é maior que a unidade.

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

B) Com tensão inicial – são os que necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para começarem a escoar. Dentre os fluidos desta classe se encontram:

❖ Plásticos de Bingham

Este tipo de fluido apresenta uma 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. Este comportamento é descrito pela equação:

$$\begin{aligned} \tau_{yx} &= \pm\tau_0 - \mu_0 \frac{du_x}{dy}, \text{ para } |\tau_{yx}| > |\tau_0| \\ \frac{du_x}{dy} &= 0, \text{ para } |\tau_{yx}| < |\tau_0| \end{aligned} \quad (3.2)$$

Na qual:

τ_0 é a tensão de cisalhamento inicial,

μ_0 é uma constante análoga à viscosidade de fluidos newtonianos.

O sinal positivo de τ_0 é utilizado quando τ_{yx} é positivo ou negativo, caso contrário.

Ex.: fluidos de perfuração de poços de petróleo, algumas suspensões de sólidos granulares.

❖ Herschel-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. Esta relação depende do expoente adimensional n , característico para cada fluido.

$$\begin{aligned}\tau_{yx} &= \pm\tau_0 - \mu_0 \left(\frac{du_x}{dy} \right)^n \quad \text{para } |\tau_{yx}| \succ |\tau_0| \\ \frac{du_x}{dy} &= 0, \quad \text{para } |\tau_{yx}| \prec |\tau_0|\end{aligned}\tag{3.3}$$

Existe ainda o Modelo de Casson, comumente utilizado para descrever o estado estacionário de substâncias como sangue, iogurte, purê de tomate, etc. Este modelo é descrito pela Equação:

$$\begin{aligned}|\tau_{yx}|^{\frac{1}{2}} &= |\tau_0|^{\frac{1}{2}} + \left(\mu_0 \left| \frac{du_x}{dy} \right|^n \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{para } |\tau_{yx}| \succ |\tau_0| \\ |\tau_{yx}| &= |\tau_0| \quad \text{para } |\tau_{yx}| \prec |\tau_0|\end{aligned}\tag{3.4}$$

3.2 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) Tixotrópicos

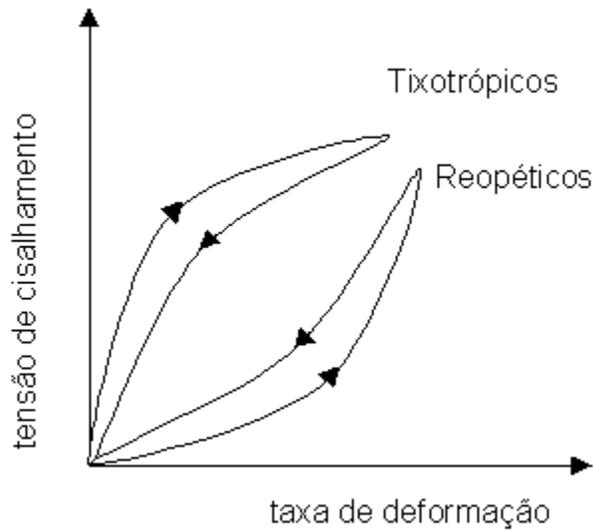
Esta classe de fluidos tem sua viscosidade diminuída com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos com o tempo quando esta cessa.

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

B) 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.

Ex.: argila bentonita.



Fonte: http://www.setor1.com.br/analises/reologia/curva_depe.htm

Figura 4: Curvas de escoamento de fluidos não newtonianos de propriedades dependentes do tempo de cisalhamento.

3.3 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).

Um modelo que descreve este tipo de comportamento é o Modelo de Maxwell (1957):

$$\tau_{ij} + t_0 \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} = -\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.5)$$

Na qual:

$t_0 = \frac{\mu}{G}$ é um tempo característico do fluido em estudo,

G é o módulo de rigidez cisalhante do fluido.

G é uma medida da resistência do material contra a distorção cisalhante e seu valor é igual à inclinação da curva da tensão de cisalhamento vs. a taxa de deformação na região elástica e é dado em N/m^2 ou lbf/in^2 .

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

4. OUTROS MODELOS

Além dos modelos apresentados anteriormente, existem modelos aplicáveis a fluidos que apresentam comportamento misto. Entre estes modelos citam-se os seguintes.

4.1 MODELO DE PRANDTL-EYRING

Este modelo baseia-se na Teoria Cinética de Eyring de líquidos e descreve o comportamento pseudoplástico para valores finitos de tensão de cisalhamento, representado pela Equação:

$$\begin{aligned}\tau_{yx} &= A \arcsin h \left(-\frac{1}{B} \frac{du_x}{dy} \right), \quad \tau_{yx} > 0 \\ \tau_{yx} &= -\mu \frac{du_x}{dy}, \quad \tau_{yx} \rightarrow 0\end{aligned}\tag{4.1}$$

Os parâmetros A e B são característicos de cada tipo de fluido. E quando a tensão de cisalhamento tende a zero, o comportamento do fluido obedece à Lei da Viscosidade de Newton e $\mu = \frac{A}{B}$.

4.2 MODELO DE ELLIS

Este modelo é dado pela Equação:

$$-\frac{du_x}{dy} = \left(\varphi_0 + \varphi_1 |\tau_{yx}|^{\alpha-1} \right) \tau_{yx}\tag{4.2}$$

Na qual α , φ_0 e φ_1 são parâmetros positivos, ajustáveis e são característicos para cada fluido.

Para um α muito maior que a unidade e baixos valores de τ_{yx} o modelo se aproxima do Modelo de Newton. Já para um α muito menor que a unidade e altos valores de τ_{yx} , se aproxima do Modelo Power Law. Este comportamento torna este modelo bastante flexível.

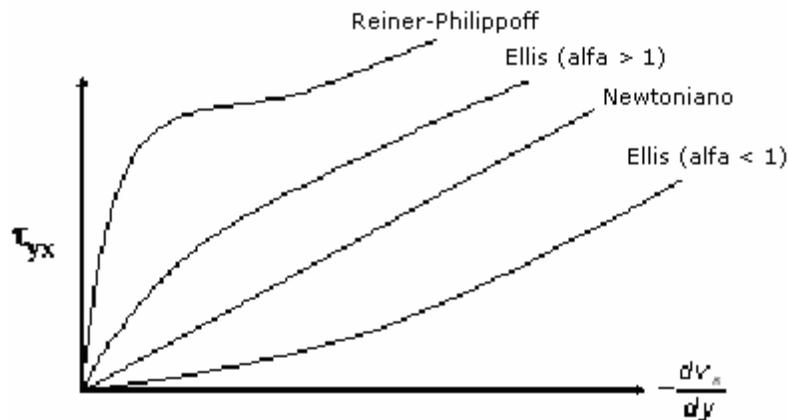
4.3 MODELO DE REINER-PHILIPPOFF

É representado pela Equação:

$$-\frac{du_x}{dy} = \left(\frac{1}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau_{yx}}{\tau_S} \right)}} \right) \tau_{yx}\tag{4.3}$$

Na qual os parâmetros μ_0 , μ_∞ e τ_S são característicos para cada tipo de fluido.

Esta equação se reduz ao Modelo de Newton para valores muito baixos ou muito altos de τ_{yx} , quando $\mu = \mu_0 = \mu_\infty$.



Fonte: [http://www.iq.uva.es/fentrans/Notas%20de%20Clase/NotasClase%20\(F.Sobron\)/FT_01%20Viscosidad.ppt](http://www.iq.uva.es/fentrans/Notas%20de%20Clase/NotasClase%20(F.Sobron)/FT_01%20Viscosidad.ppt)

Figura 5: Curvas de escoamento de fluidos não newtonianos representadas por outros modelos.

Existem muitos outros modelos empíricos descritos na literatura, cabendo ao estudante de engenharia a correta escolha ou proposição de um novo modelo que possa representar o fluido de interesse adequadamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BENNET, C. O., MYERS, J. E. *Fenômenos de Transporte, Quantidade de Calor e Massa*, McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1978.

BIRD, R. B., STEWARD, W. E., LIGHTFOOT, E. N. *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons Inc., 1960.

HONEY, H. C., PRETORIUS, W. A. *Laminar Flow Pipe Hydraulics of Pseudoplastic-Thixotropic Sewage Sludges*, Department of Chemical Engineering, University of Pretoria, South Africa, 1999.

BAILEY, W. J., WEIR, I. S. *Investigation of Methods for Direct Rheological Model Parameter Estimation*, Journal of Petroleum Science and Engineering, vol. 21, pp. 1-13, 1998.

<http://orbita.starmedia.com/~engomagem/reologia.htm>

<http://silver.neep.wisc.edu/~lakes/VE.html>

<http://web.mit.edu/nnf>

<http://www.inti.gov.ar/dpnm/Visco001.htm>

<http://www.vilastic.com/>

http://www.setor1.com.br/analises/reologia/re_do.htm acesso em
01/03/2005

<http://www.unb.br/ig/glossario/verbete/reologia.htm> acesso em 01/03/2005

<http://www.unb.br/ig/glossario/verbete/viscosidade.htm> acesso em
01/03/2005

<http://www.noebenj.ubbi.com.br> acesso em 01/03/2005