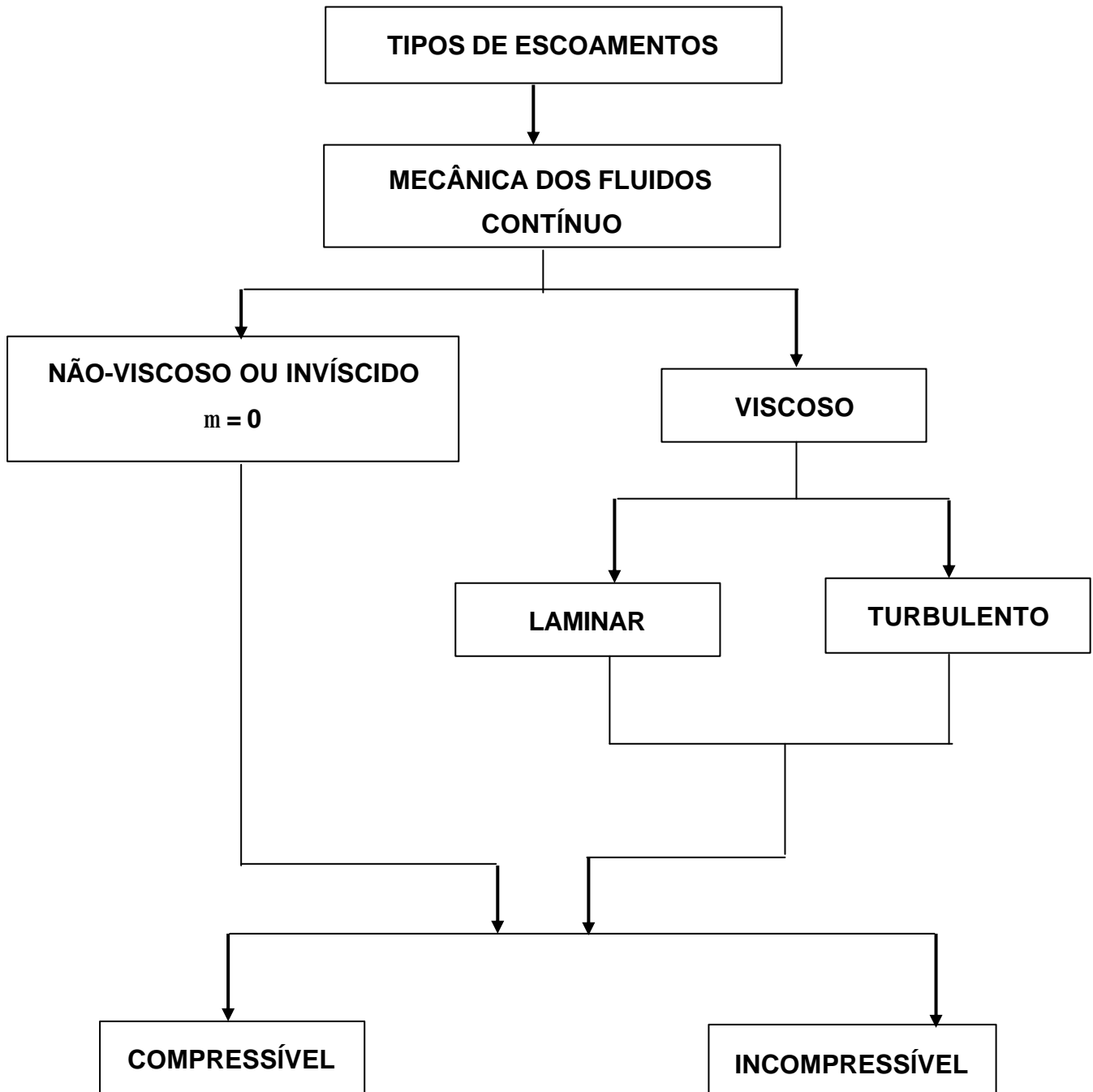




Tipos de fluidos:

Os vários tipos de problemas encontrados em Mecânica dos Fluidos podem ser classificados com base na observação de características físicas do campo de fluxo.

Uma possível classificação é mostrada no esquema que se segue:





Fluidos compressíveis e incompressíveis

Compressíveis → r varia

Incompressíveis → r é constante

Fluido ideal

Por definição, escoamento ideal ou escoamento sem atrito, é aquele no qual não existem tensões de cisalhamento atuando no movimento do fluido.

De acordo com a lei de Newton, para um fluido em movimento esta condição é obtida quando a viscosidade do fluido é nula:

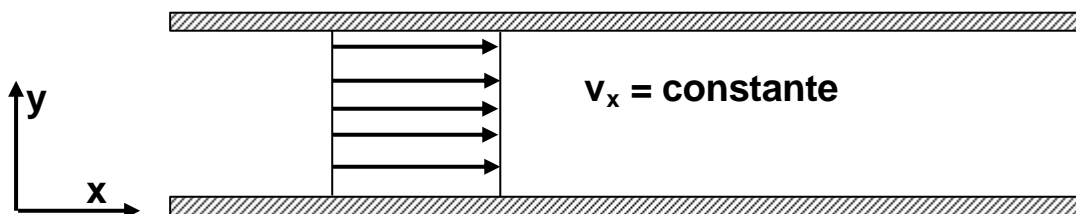
$$\mu = 0$$

ou quando os componentes da velocidade do escoamento não mais exibem variações de grandeza na direção perpendicular ao componente da velocidade considerada:

$$\frac{dv_x}{dy} = 0$$

É claro que não existem fluidos cuja viscosidade é nula, porém, a ausência de forças de cisalhamento no movimento de um fluido simplifica enormemente o tratamento matemático. Além disso, a informação qualitativa obtida é extremamente útil.

Um fluido que quando em escoamento satisfaz as condições acima, é chamado de fluido ideal.



Condição e escoamento ideal

Fluido perfeito

Por definição um fluido é dito perfeito, se for incompressível ($\rho = \text{constante}$), e se sua viscosidade for nula ($\mu = 0$)

Um fluido perfeito indica a ausência de tensões de cisalhamento entre as camadas de fluido. Deste modo, duas camadas adjacentes de fluido podem se mover com velocidades diferentes (slip flow) sem afetarem-se mutuamente por forças de atrito interno. A única influência que as camadas exercem entre si é devido a sua geometria, que deve estar compatível com a fronteira sólida.

Para o fluido perfeito existe a condição de deslizamento entre o fluido e a fronteira sólida. A única ação da fronteira sólida é a de orientar a direção do escoamento do fluido, sem nenhuma ação viscosa.

Deste modo, qualquer camada do fluido pode ser substituída por uma lâmina de sólido de igual geometria, pois a configuração do escoamento não se altera.

Podemos concluir, portanto, que as tensões de cisalhamento são grandezas que comunicam informações dinâmicas de uma camada de fluido para outra. Na ausência de tensões cisalhantes não há esta transmissão de informações entre as camadas de fluido.

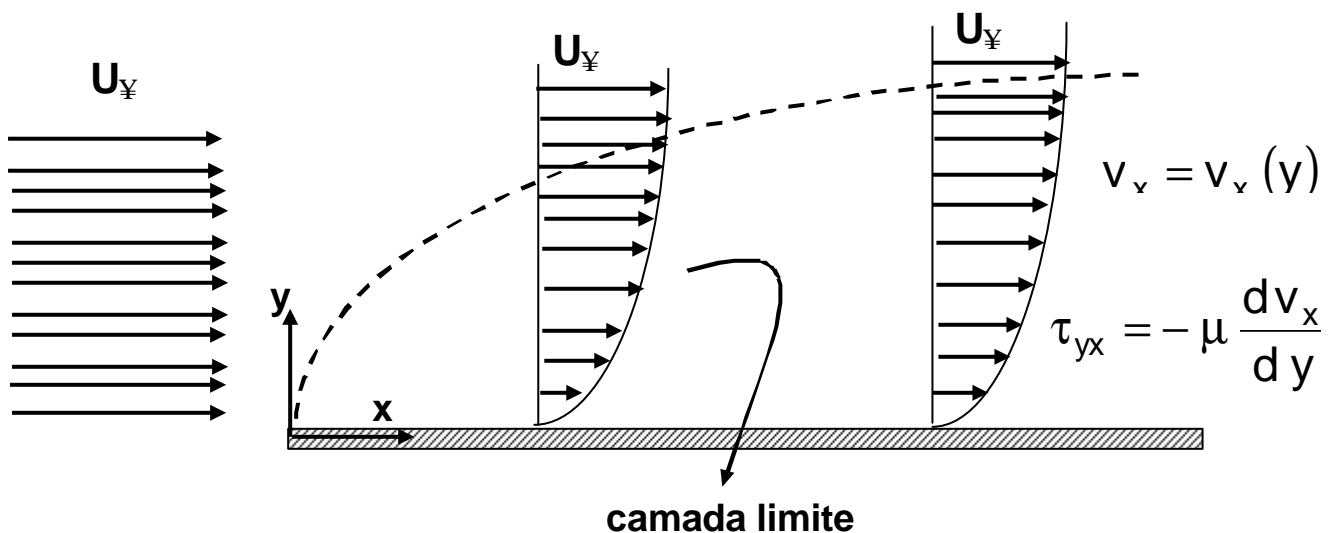
O estudo de fluidos perfeitos fornece informações qualitativas importantes, principalmente nas regiões de escoamento onde as forças viscosas são desprezíveis em relação às forças de inércia.

Fluido real

A presença dos efeitos viscosos é inerente ao escoamento de fluidos reais. Os fluidos reais não apresentam uma velocidade de deslizamento finita em relação a uma superfície sólida ou sobre uma camada adjacente.

A viscosidade do fluido real, que determina o grau de atrito entre as camadas de fluido e entre o fluido e a parede sólida, é responsável pela variação de velocidade (gradiente de velocidade) entre as camadas.

Próximo a uma parede sólida estacionária, a velocidade de um fluido real cresce gradualmente do valor zero na fronteira sólida, até um valor limite da velocidade onde os efeitos viscosos não se fazem mais sentir. Isto é, próximo a uma fronteira sólida há a formação de uma camada de fluido onde efeitos viscosos são mais acentuados. Esta camada é conhecida como CAMADA LIMITE.



Placa plana imersa num fluido em escoamento

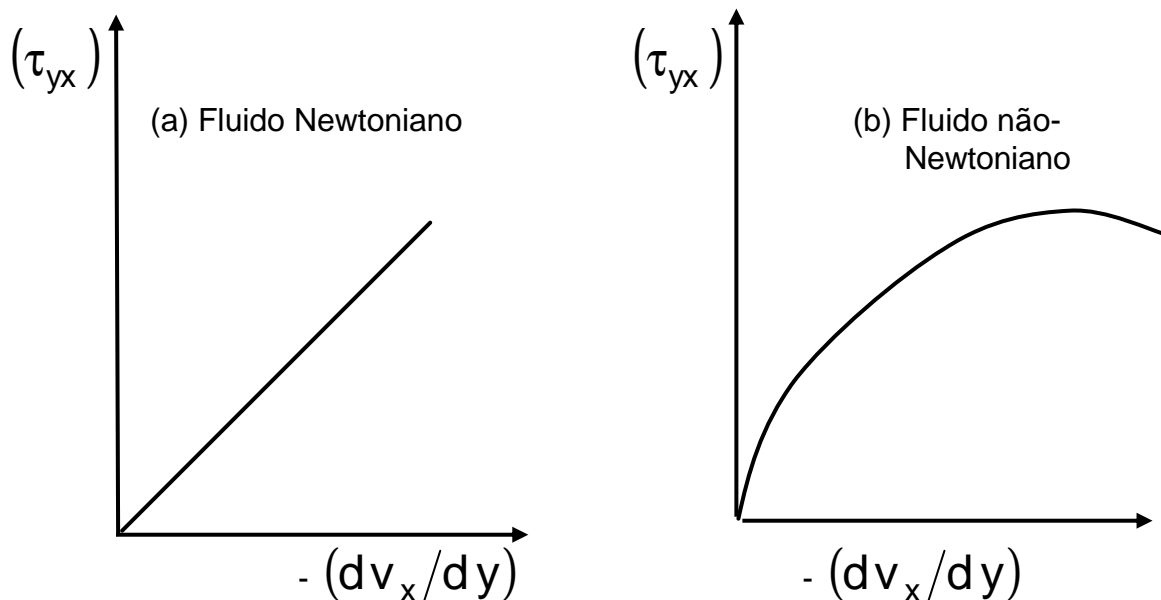
Os fluidos reais podem ser subdivididos em duas classes principais. Fluidos Newtonianos e não-Newtonianos.

Os fluidos Newtonianos são aqueles para os quais a viscosidade dinâmica (μ) é independente da taxa de deformação (gradiente de velocidade), isto é, a viscosidade na expressão da lei de Newton é uma constante para cada fluido Newtoniano, a uma dada pressão e temperatura.



Um diagrama típico da tensão de cisalhamento (τ_{yx}) em função da taxa de deformação (dv_x/dy) é mostrado na figura que se segue (a). A tensão de cisalhamento (τ_{yx}) é proporcional ao gradiente de velocidade (dv_x/dy), e o coeficiente angular da reta é a viscosidade dinâmica (μ).

Fluidos não-Newtonianos são aqueles para os quais a “viscosidade”, numa dada pressão e temperatura, é uma função do gradiente de velocidade. Fluidos como suspensões coloidais, emulsões e gels são incluídos nesta classificação. O diagrama da tensão de cisalhamento em função do gradiente de velocidade para um fluido não-Newtoniano encontra-se na figura a seguir (b).

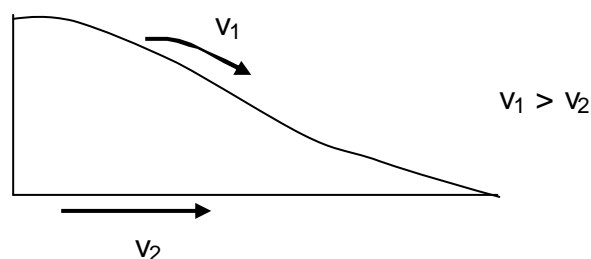


Tensão de cisalhamento *versus* gradiente de velocidade

Calculando-se a inclinação da curva em cada ponto a viscosidade do fluido pode ser determinada.

Observação:

Em escoamentos com escorregamento, não vale a hipótese da aderência.





Fluidos não-Newtonianos

Com a finalidade de simplificar a notação, a taxa de deformação (gradiente de velocidade) será representada por D . A “viscosidade” de um fluido não-Newtoniano será representada pela letra h .

De um modo geral, os fluidos não-Newtonianos, podem ser divididos em três categorias principais, a saber.

1. Fluidos para os quais a “viscosidade” depende apenas da taxa de deformação.

$$\eta = \eta(D)$$

Esses fluidos são aqueles cujas características reológicas (*) são invariantes com o tempo e por isso mesmo são chamados de “time-independent fluids”.

(*) Reologia: a ciência do escoamento e da deformação. Estuda as propriedades mecânicas dos gases, líquidos, plásticos, substâncias asfálticas e materiais cristalinos. Logo, o campo da reologia se estende desde a mecânica dos fluidos Newtonianos por uma parte, até a elasticidade de Hooke por outra. A região compreendida entre elas corresponde a deformação e escoamento de todos os tipos de materiais pastosos e suspensões.

2. Fluidos de natureza física mais complexa, para os quais a relação (h) entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação depende da própria taxa de deformação, do tempo durante o qual o fluido foi mantido sob a ação da tensão cisalhante e também da variação com o tempo da taxa de deformação.

Em outras palavras, as características do fluido são dependentes da “história” do fluido, são chamados “time dependent fluids”.

$$\eta = \eta(D, t, \dot{D})$$

3. Fluidos que apresentam características de sólidos elásticos e também de líquidos viscosos. São chamados fluidos visco-elásticos, (ex.: pixe).

Fluidos “time independents”

Esta categoria de fluidos não-Newtonianos pode ainda ser subdividida em dois tipos.

- Fluidos que apresentam uma tensão crítica de cisalhamento

Este tipo de fluido constitui o desvio mais simples do comportamento do fluido newtoniano.

O principal representante deste tipo de fluido é o chamado fluido plástico de Bingham.

Bingham verificou que certas tintas e suspensões de pigmentos apresentam uma tensão crítica de cisalhamento, isto é, para que possa haver escoamento do fluido é necessário que o valor dessa tensão crítica (representada por τ_0) seja ultrapassada.



O comportamento reológico deste tipo de fluido pode ser representado pela seguinte equação:

$$\tau = \eta D + \tau_0 \quad \text{se} \quad \tau > \tau_0 \quad (1)$$

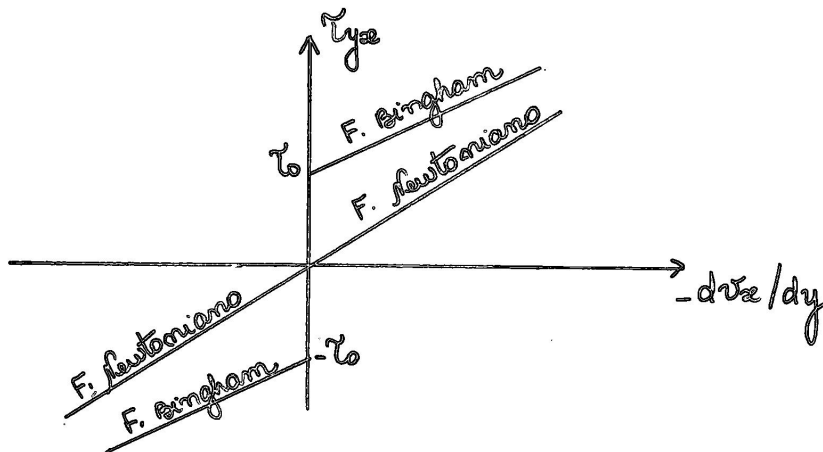
e

$$D = 0 \quad \text{se} \quad \tau < \tau_0 \quad (2)$$

A equação (2) indica que para valores de $\tau < \tau_0$ não há escoamento, isto é, não há deformação do fluido ($D = 0$).

Pela equação (1) pode-se verificar que para valores de tensão cujo $\tau > \tau_0$ o fluido escoar como se fosse fluido Newtoniano, isto é, na fase de escoamento o comportamento reológico do fluido de Bingham pode ser caracterizado pela lei de Newton da viscosidade.

Para este tipo de fluido, a curva de escoamento ou reograma seria da forma:



Fluido de Bingham

Em analogia com os fluidos Newtonianos, a viscosidade aparente de um fluido de Bingham é dada por:

$$\eta_a = \frac{\tau}{D} = \frac{\tau_0 + \eta D}{D} = \eta + \frac{\tau_0}{D} \quad (3)$$

Cabe aqui uma observação: a equação acima é apenas uma maneira de se representar a viscosidade aparente pois τ e D são tensores e como tal não podem ser divididos. Pode-se efetuar os cálculos quando se trabalhar com componentes de tensor.

- Fluidos que não apresentam uma tensão crítica de cisalhamento.

Este tipo de fluido é o mais encontrado e um dos modelos utilizados para representar suas características reológicas é o de Ostwald-de-Waele (Power-Law Fluids). A equação que descreve o comportamento deste tipo de fluido é:

$$\tau = K D^n \quad (4)$$

onde:

n – índice de comportamento do escoamento, (index flow behaviour)

K – índice de consistência do fluido, (index of fluid consistency)

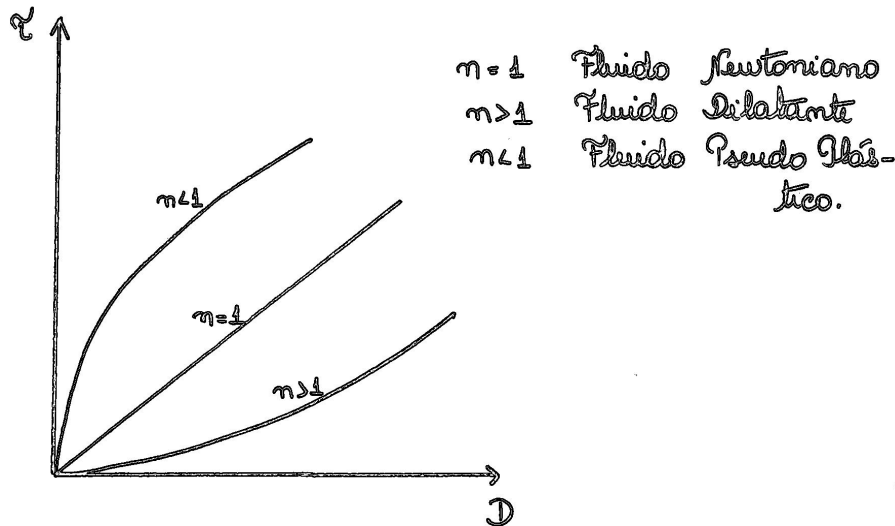


O índice n indica o desvio em relação ao comportamento Newtoniano.

➤ Para $n = 1 \rightarrow K = \mu \rightarrow$ fluido Newtoniano

Para um dado valor de n e D , quanto maior o valor de K , mais “viscoso” é o fluido, isto é, o fluido apresenta maior consistência.

Um reograma típico de um fluido “power-law” é:



Reograma de fluidos “Power-Law”

O modelo de Ostwald-de-Waele é um modelo empírico com duas constantes a determinar. Para valores moderados da taxa de deformação (D), ele representa com bastante precisão as características reológicas da maioria dos fluidos “time independent” sem tensão crítica de cisalhamento, porém este modelo falha completamente para valores extremos da taxa de deformação.

Experimentalmente é sabido que nessas regiões
 $(D \rightarrow 0 \text{ e } D \rightarrow \infty)$

os fluidos “time independent” apresentam um comportamento reológico que pode ser descrito pela lei da viscosidade de Newton.

Este modelo, portanto, não pode ser usado para descrever o comportamento destes fluidos nestas regiões. Este fato pode ser demonstrado se considerarmos a expressão da viscosidade aparente para os fluidos “time independents” descritos pelo modelo de Ostwald-de-Waele:

$$\eta_a = \frac{\tau}{D} = \frac{K D^n}{D} \rightarrow \eta_a = K D^{n-1} \quad (5)$$

Para $n = 1$ não há problema, pois

$$\eta_a = K \quad \text{sempre}$$

Para $n \neq 1$ a viscosidade aparente é função de D^{n-1} e para $D \rightarrow 0$ ou $D \rightarrow \infty$, η_a assume valores externos (0 ou ∞), o que fisicamente é um absurdo pois, um fluido real apresenta sempre um valor finito de viscosidade.



Uma outra limitação do modelo de Ostwald-de-Waele é que a constante K depende da constante n.

$$\tau = K D^n$$

$$\tau [=] \frac{F}{L^2} [=] \frac{M}{L T^2}$$

$$D [=] \frac{L}{T} \frac{1}{L} [=] \frac{1}{T}$$

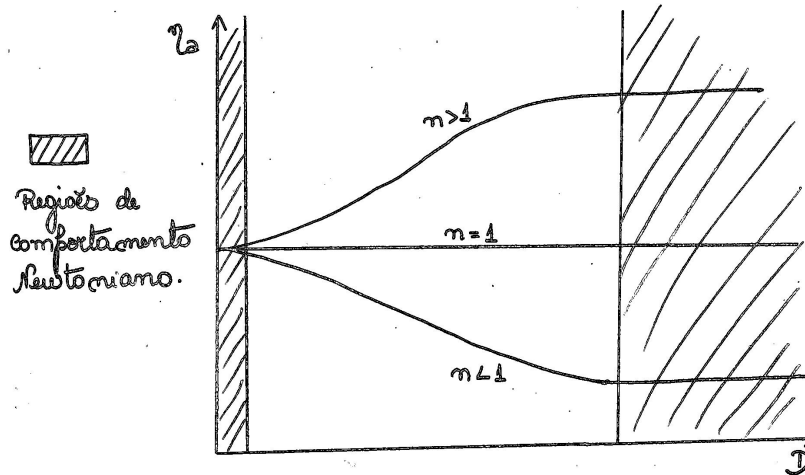
$$D^n [=] \frac{1}{T^n}$$

$$K [=] \frac{\tau}{D^n} [=] \frac{M}{L T^2} T^n \quad \rightarrow \quad K [=] \frac{M T^{n-2}}{L}$$

Para $n = 1 \rightarrow K = \frac{M}{L T}$ que é a dimensão da viscosidade.

Apesar das limitações, este modelo tem sido extensivamente utilizado em trabalhos teóricos e experimentais.

Da equação (4), um gráfico de η_a em função de D para um fluido “power law” é do tipo:

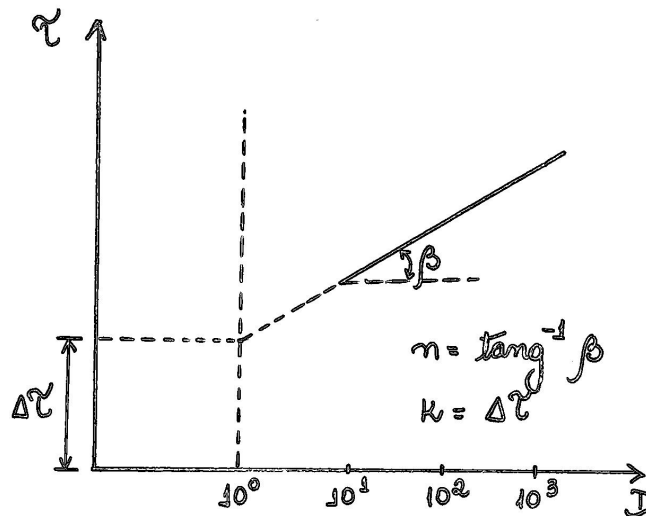


Viscosidade aparente η_a versus D

Para se determinar as características reológicas de um fluido “power law” pode-se utilizar o método gráfico. Em um papel log-log os valores de τ e D medidos se ajustam em uma linha reta, o que se pode verificar tirando-se o logaritmo da equação (4).

$$\log \tau = \log K + n \log D \quad (6)$$

A inclinação da reta fornece o valor de n (no caso de $n = 1$ a inclinação da reta é de 45°). O valor de K é obtido diretamente pela interseção da reta com a vertical que passa por $D = 1$.



Determinação gráfica de n e K

Modelo de Ellis:

Para levantar as limitações impostas pelo modelo de Ostwald-de-Waele, Ellis sugeriu um modelo empírico da forma:

$$\tau = \frac{1}{A + B \tau^{\alpha-1}} D \quad (7)$$

onde A, B e α são parâmetros característicos do fluido.

Este modelo inclui ao mesmo tempo o modelo de Ostwald-de-Waele e o de Newton.

- A = 0 → modelo de Ostwald-de-Waele
- B = 0 → modelo de Newton

Além disso:

- Se $\alpha < 1$, o modelo de Ellis se aproxima do modelo de Newton para altos valores da tensão de cisalhamento, τ .
- Se $\alpha > 1$, o modelo de Ellis se aproxima do modelo de Newton para baixos valores de τ .

Essas conclusões podem ser mais facilmente verificadas se considerarmos o modelo de Ellis na seguinte forma:

$$A \tau + B \tau^{\alpha} = D \quad (8)$$

A inclusão de um terceiro parâmetro reológico do fluido, torna a solução matemática do problema de escoamento bem mais complicada e, portanto, deve-se analisar com cuidado as condições de operação a fim de se decidir sobre o modelo reológico a ser usado.



Fluidos “time dependents”

Esses fluidos são caracterizados pelo fato de que a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação varia com o tempo.

Em geral são classificados em dois grupos distintos:

1. Fluidos tixotrópicos: são aqueles que apresentam um decréscimo de viscosidade aparente com o tempo, para um dado valor da tensão de cisalhamento e da temperatura.

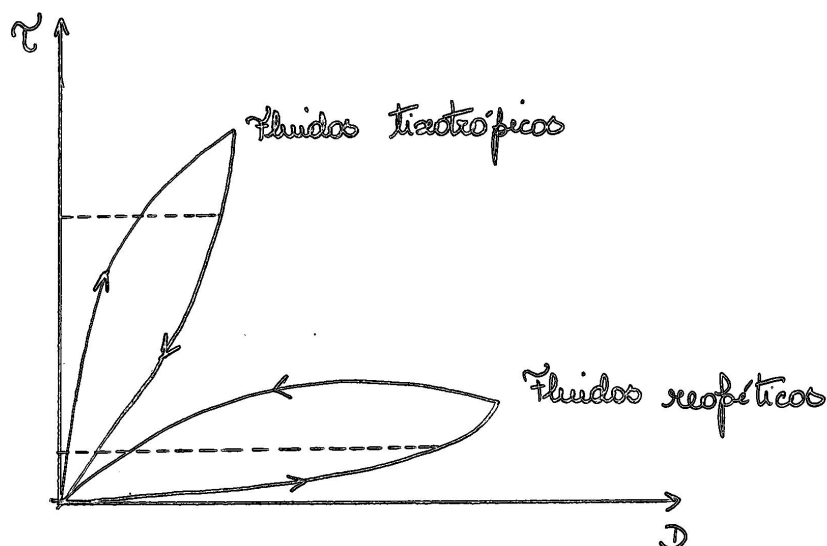
Se a curva de escoamento do fluido tixotrópico é determinada partindo-se de um valor zero até um valor máximo da tensão de cisalhamento e a partir desse ponto começa-se a diminuir a tensão até o valor zero novamente, um tipo de histerese vai ser observado.

Um viscosímetro de cilindros concêntricos é, em geral, usado para determinações dessa natureza.

Na figura que será apresentada a seguir, as setas indicam a ordem cronológica em que foram feitas as medidas. É importante notar que para um mesmo fluido, a curva de histerese poderia ser diferente para uma diferente “time-history”.

O fenômeno de tixotropia pode ser aproximado pelo da pseudoplasticidade no qual o tempo necessário para que haja um rearranjo estrutural, a fim de se estabelecer a estrutura primitiva, é grande.

2. Fluidos reopéticos: Ao contrário dos tixotrópicos, são aqueles que apresentam um acréscimo da viscosidade aparente com o tempo, para um dado valor da tensão de cisalhamento e da temperatura.



Reograma de fluidos “time-dependents”

Fluidos visco-elásticos:

São aqueles que recobram parcialmente a forma original ao cessar o esforço cisalhante.