



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



# ENGENHARIA FÍSICA

## FENÔMENOS DE TRANSPORTE - A

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

[sergio.montoro@usp.br](mailto:sergio.montoro@usp.br)



## **Fenômenos de Transporte**

Os fenômenos de transporte relacionam assuntos que seguem princípios básicos semelhantes, permitindo uma formulação básica para os diversos fenômenos.

## **Fenômenos de Transferência**

Tratam da movimentação de uma grandeza física de um ponto para outro do espaço por meio de tratamento matemático. São elas quantidade de movimento, transporte de energia térmica e de massa.



## Aplicações na Engenharia

**Na Engenharia Ambiental:** ligados à poluição ambiental, os Fenômenos de Transporte tornam-se ferramentas importantes para o estudo da difusão de poluentes no ar, na água e no solo;

**Na Engenharia Elétrica e Eletrônica:** os Fenômenos de Transporte adquirem importância cálculos de dissipação de potência – otimização de gasto de energia;

**Na Engenharia Mecânica:** processos de usinagem, tratamentos térmicos, cálculo de máquinas hidráulicas – mecânica dura. Processos de transferência de calor das máquinas térmicas e frigoríficas na denominada mecânica mole.



## **BIBLIOGRAFIA**

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Fenômenos de Transporte. LTC Editora, 2004.

FOX, R. W., McDONALD, A. T. Introdução à Mecânica dos Fluidos. LTC Editora, 2001.

SISSOM, L. E., PITTS, D. R. Fenômenos de Transporte. Ed. Guanabara, 1988.

BRUNETTI, F. Mecânica dos Fluidos, 2ª edição revisada. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



# MECÂNICA DOS FLUIDOS

## AULA 1

### INTRODUÇÃO

DEFINIÇÃO DE FLUIDO, CONCEITOS E  
PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



## **INTRODUÇÃO**

**Mecânica dos Fluidos** é a ciência que estuda o comportamento físico dos fluidos, assim como as leis que regem esse comportamento.

As bases lançadas pela Mecânica dos Fluidos são fundamentais para muitos ramos de aplicação na engenharia. Dessa forma, o escoamento de fluidos em canais e condutos, a lubrificação, os esforços em barragens, os corpos flutuantes, as máquinas hidráulicas, a ventilação, a aerodinâmica, estudos de impacto ambiental, realização de programas e projetos de gerenciamento de recursos hídricos, saneamento básico,



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



tratamento de resíduos e recuperação de áreas contaminadas ou degradadas e muitos outros assuntos lançam mão das leis da Mecânica dos Fluidos para obter resultados de aplicação prática.

Como se pode observar, pelo exposto, poucos são os ramos da engenharia que escapam totalmente do conhecimento dessa ciência que se torna, assim, uma das de maior importância entre as que devem fazer parte dos conhecimentos básicos do engenheiro.



## CONCEITOS FUNDAMENTAIS E DEFINIÇÃO DE FLUIDO

A definição de fluido é introduzida, normalmente, pela comparação dessa substância com um sólido.

A definição mais elementar diz: "*Fluido é uma substância que não tem uma forma própria, assume o formato do recipiente*". A Figura 1.1 ilustra o significado desse enunciado.



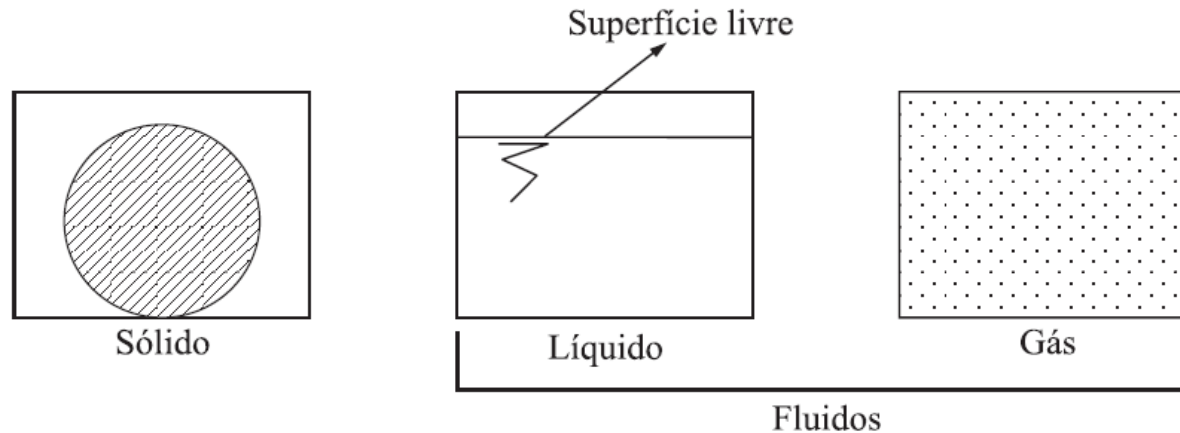


Figura 1.1

Os fluidos são, portanto, os líquidos e os gases, sendo que estes ainda se distinguem dos primeiros por ocuparem todo o recipiente, enquanto os líquidos apresentam uma superfície livre.



Se o problema fundamental fosse apenas reconhecer os fluidos, a definição apresentada seria perfeitamente suficiente para essa finalidade.

Entretanto, é possível introduzir uma outra que, apesar de ser mais complexa, permite construir uma estrutura lógica que será de grande utilidade para o desenvolvimento da Mecânica dos Fluidos.

Essa definição está novamente ligada à comparação de comportamento entre um sólido e um fluido, por uma observação prática denominada “Experiência das Duas Placas”, descritas a seguir.



Seja um sólido preso entre duas placas planas, uma inferior fixa e a outra superior solicitada por uma força tangencial  $F_t$  (na direção do plano da placa) (Figura 1.2a)

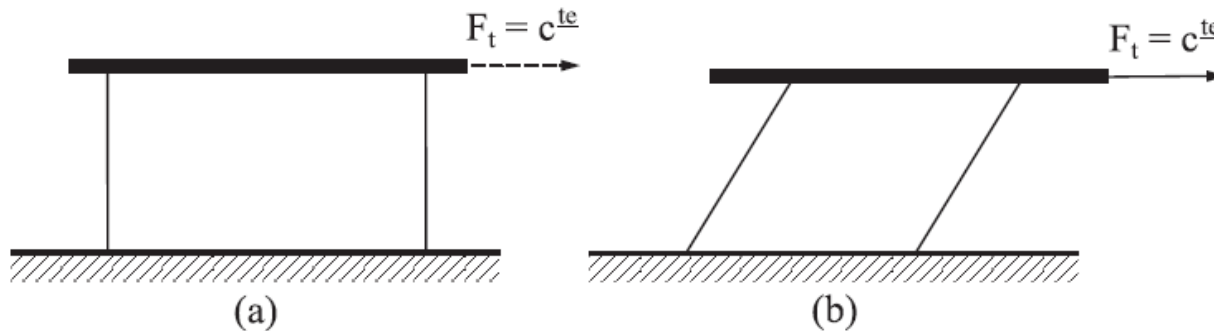


Figura 1.2

Mantida a força  $F_t$  constante, nota-se que o sólido se deforma angularmente (Figura 1.2b) até alcançar uma nova posição de equilíbrio estático.



Pode-se dizer, então, que um sólido, solicitado por uma força tangencial constante, deforma-se angularmente, mas atinge uma nova configuração de equilíbrio estático (Figura 1.2b).

A mesma experiência será agora realizada colocando-se um fluido entre as placas. Suponha que seja possível, por exemplo, por meio de um corante, visualizar um certo volume ABCD do fluido (Figura 1.3a).

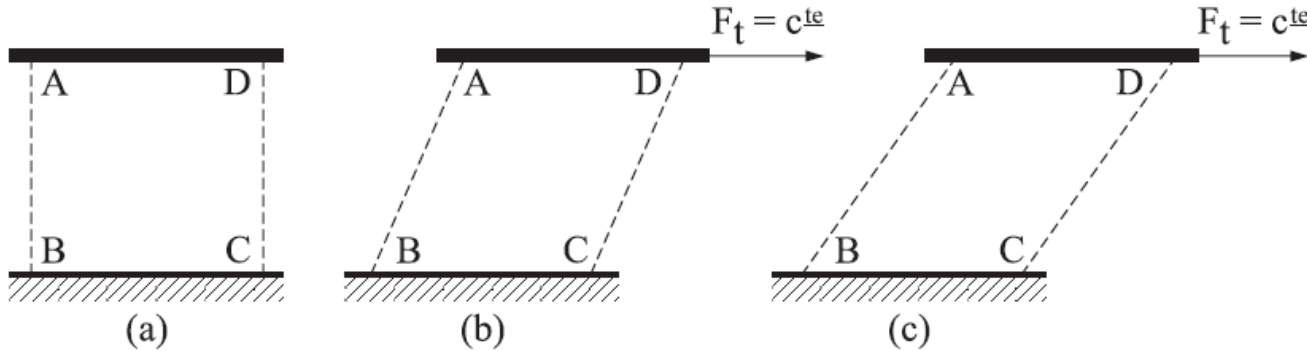


Figura 1.3

Se a placa superior adquire uma velocidade  $v$ , os pontos do fluido em contato com ela terão a mesma velocidade  $v$ , e os pontos do fluido em contato com a placa fixa ficarão parados junto dela.



**Princípio da Aderência:** *Os pontos de um fluido, em contato com uma superfície sólida, aderem aos pontos dela, com os quais estão em contato.*

Essa experiência permite a distinção entre sólidos e fluidos, pois, enquanto os sólidos se deformam limitadamente sob a ação de esforços tangenciais pequenos, os fluidos se deformam continuamente sem alcançar uma nova posição de equilíbrio estático.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



Pode-se então dizer que:

*Fluido é uma substância que se deforma continuamente, quando submetida a uma força tangencial constante qualquer ou, em outras palavras, fluido é uma substância que, submetida a uma força tangencial constante, não atinge uma nova configuração de equilíbrio estático.*



## TENSÃO DE CISALHAMENTO – Lei de Newton da viscosidade

Seja uma força  $F$  aplicada sobre uma superfície de área  $A$  (Figura 1.4). Essa força pode ser decomposta segundo a direção da normal à superfície e a da tangente, dando origem a uma componente normal e outra tangencial.

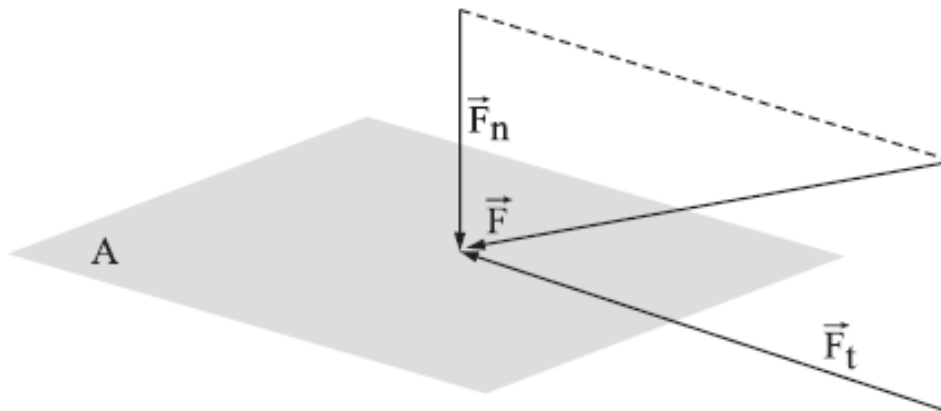


Figura 1.4





Define-se tensão de cisalhamento média como sendo o quociente entre o módulo da componente tangencial da força e a área sobre a qual está aplicada.

$$\tau = \frac{F_t}{A}$$

Em outras palavras: tensão de cisalhamento  $\tau$  é a força tangencial por unidade de área. As unidades mais utilizadas para essa grandeza serão o  $\text{kgf/m}^2$  do sistema MK\*S (Técnico), o  $\text{dina/cm}^2$  (CGS) e o  $\text{N/m}^2$  (SI).



## LEI DE NEWTON – escoamento Unidimensional

A seguir será descrito outro fato notável que pode ser observado na experiência das duas placas.

A Figura 1.5b mostra o aparecimento de  $\tau$  devido à velocidade relativa  $v_1 - v_2$ , que cria um escorregamento entre as duas camadas indicadas.

Newton descobriu que em muitos fluidos a tensão de cisalhamento é proporcional ( $\alpha$ ) ao gradiente da velocidade, isto é, à variação da velocidade com  $y$ .

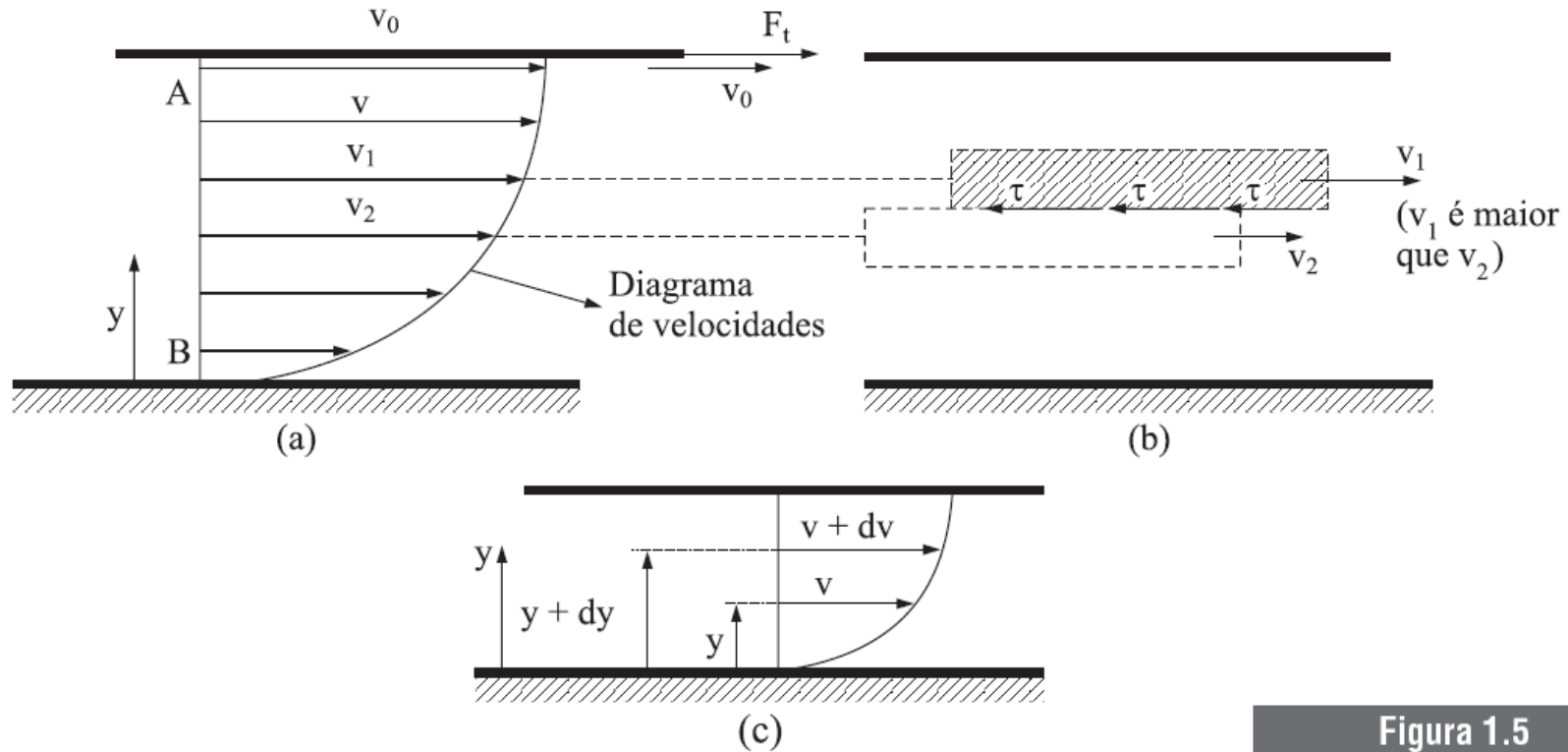


Figura 1.5



Disso pode-se traduzir a lei de Newton da viscosidade:

$$\tau \propto \frac{dv}{dy} \quad \text{ou} \quad \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} = cte$$

Os fluidos que obedecem a essa lei são ditos fluidos newtonianos.

Os fluidos que se comportam de forma a obedecer à equação acima são a grande maioria, como água, ar, óleos, etc., e os restantes, chamados não-newtonianos, não serão abordados no nosso estudo, pois são de pequeno interesse geral, sendo objeto de estudos muito especializados.



## Uma pequena complementação = Tipos de Fluidos

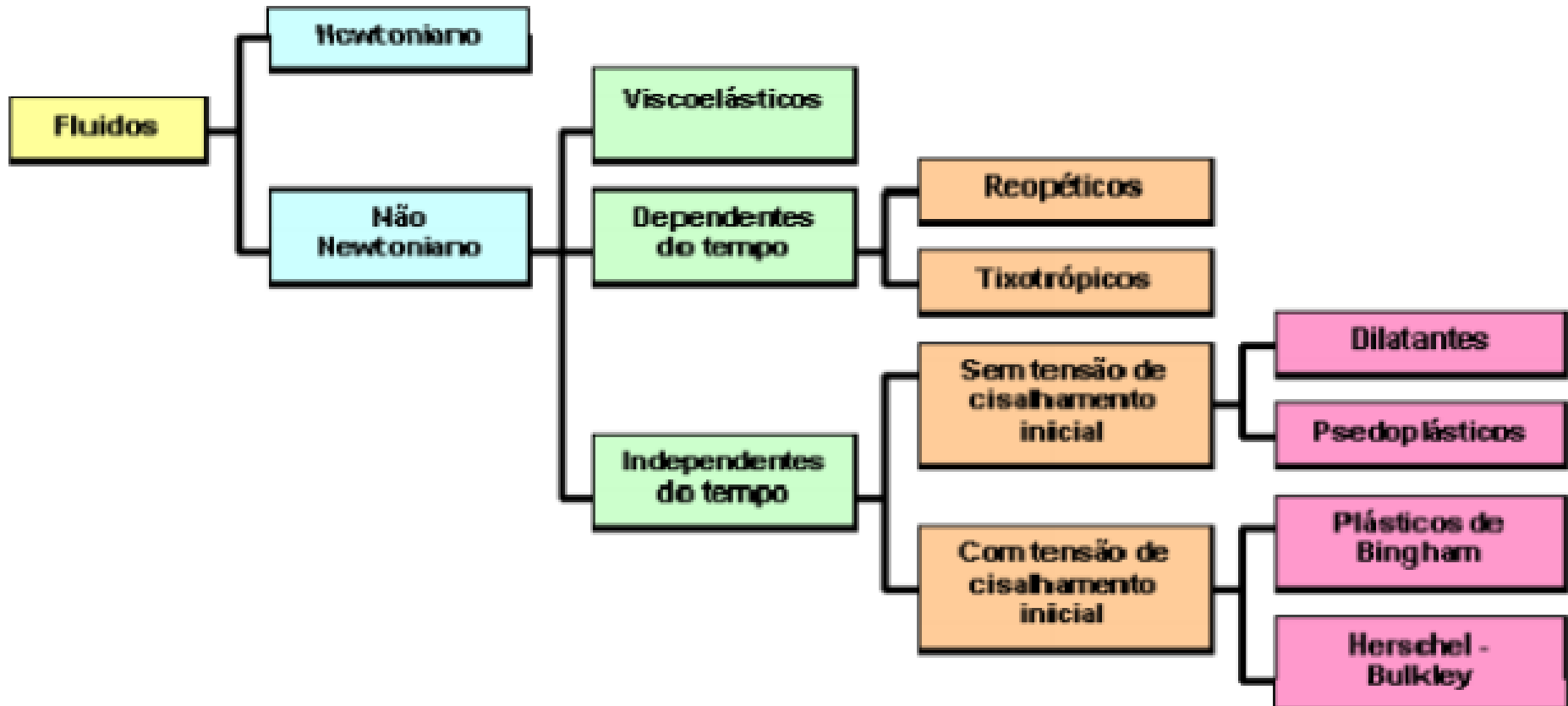
Os fluidos podem ser divididos em duas características a partir de um conceito que relaciona taxa de deformação e tensão de cisalhamento, mas eles também podem ser classificados quanto à deformação. Dessa forma, eles podem ser:

**a) Reversíveis ou elásticos:** obedecem à lei de Hooke (uma tensão aplicada a um corpo sólido causa uma deformação), possuem deformação reversível e não apresentam escoamento.

**b) Irreversíveis ou viscosos:** obedecem à lei de Newton (viscosidade constante), possuem deformação irreversível e apresentam escoamento.



## Uma pequena complementação = Tipos de Fluidos



Classificação dos fluidos segundo comportamento reológico



## Uma pequena complementação = Tipos de Fluidos



Classificação dos fluidos segundo comportamento reológico



## Fluidos não-newtonianos: independentes do tempo

### ❖ **Sem tensão limite de escoamento:**

**a) Dilatante:** A viscosidade aumenta quando a taxa de cisalhamento é aumentada. Alguns exemplos são soluções de açúcar e amido.

**b) Pseudoplástico:** a viscosidade diminui com o aumento da tensão.

Em repouso apresentam suas moléculas desordenadas, e quando são submetidos a uma tensão, suas moléculas tendem a direciona-se na direção da mesma. Possuem como característica o fato da viscosidade diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento, tendo como exemplos massas de cerâmica e cimento.





## Fluidos não-newtonianos: independentes do tempo

### ❖ Com tensão limite de escoamento:

**a) Binghamianos:** requerem a aplicação de uma tensão para deformação. *Plásticos de Bingham:* este fluido possui uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação quando submetido a tensões acima da tensão limite de escoamento. Alguns exemplos são fluidos de perfuração de poços, algumas suspensões de sólidos granulados, chocolate, pasta de dente.

**b) Herschel-Bulkley:** Acima da tensão limite de escoamento, também possuem uma relação não linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação.



## Fluidos não-newtonianos: dependentes do tempo

São fluidos que possuem propriedades que variam no tempo quando submetidos a uma mesma tensão de cisalhamento. Eles podem ser divididos em: **reopéticos e tixotrópicos.**

**Fluido reopético:** aumenta a viscosidade aparente quando a taxa de deformação aumenta.

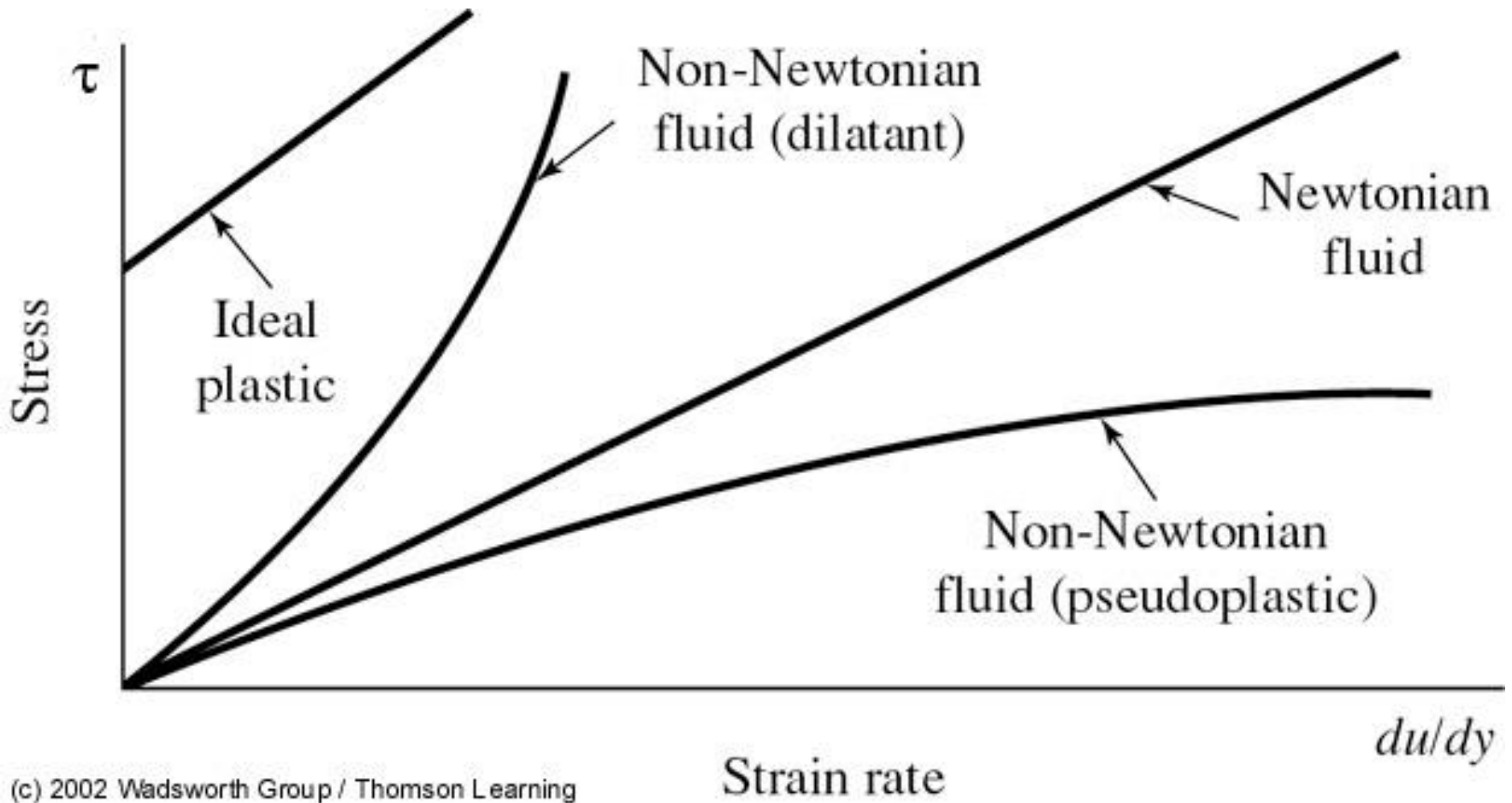
São fluidos que apresentam aumento da viscosidade com o tempo quando submetidos à deformação constante. Seu valor retorna ao inicial quando a deformação é interrompida, tendo também comportamento reversível. Exemplo desses fluidos é a argila bentonita, alguns lubrificantes, maionese.

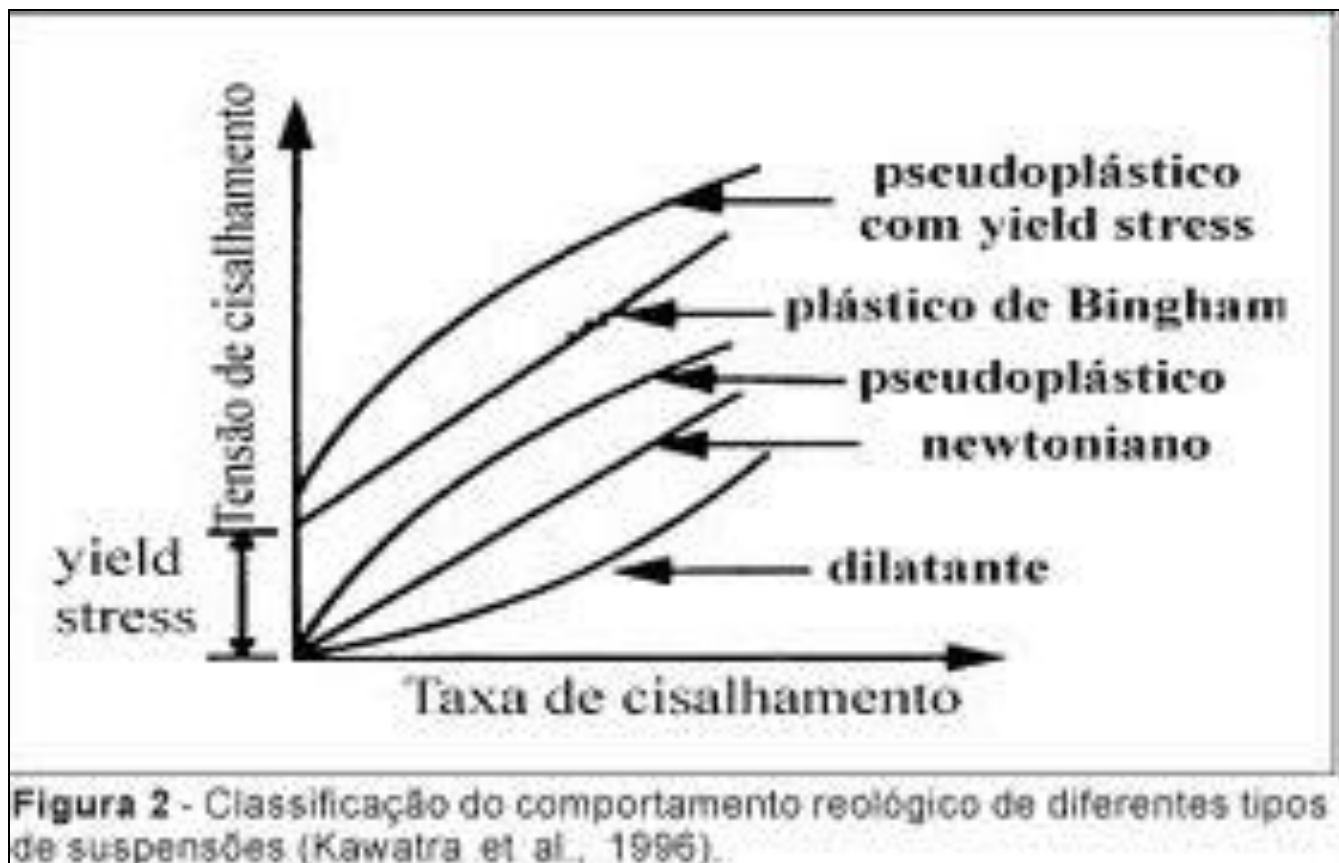


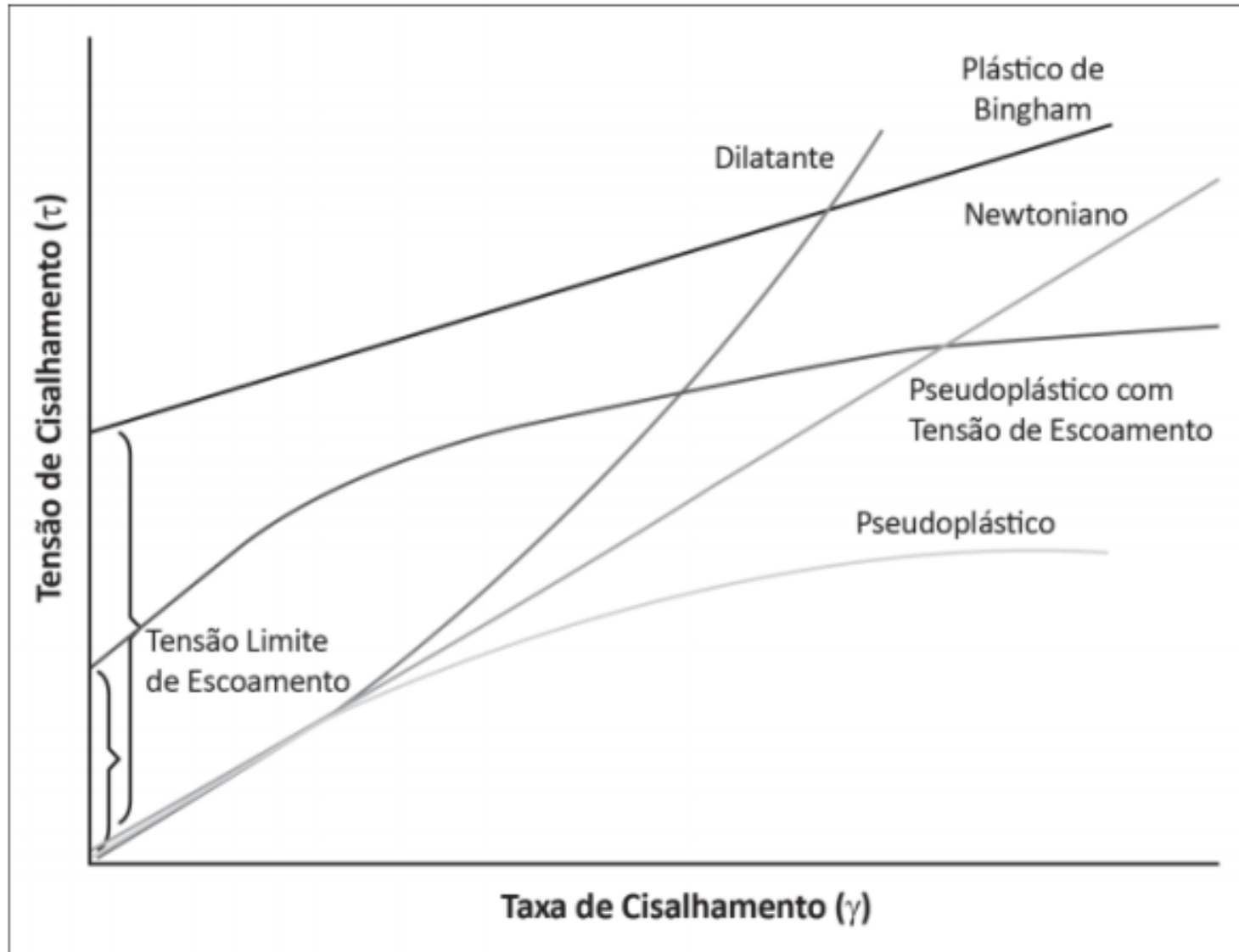
## Fluidos não-newtonianos: dependentes do tempo

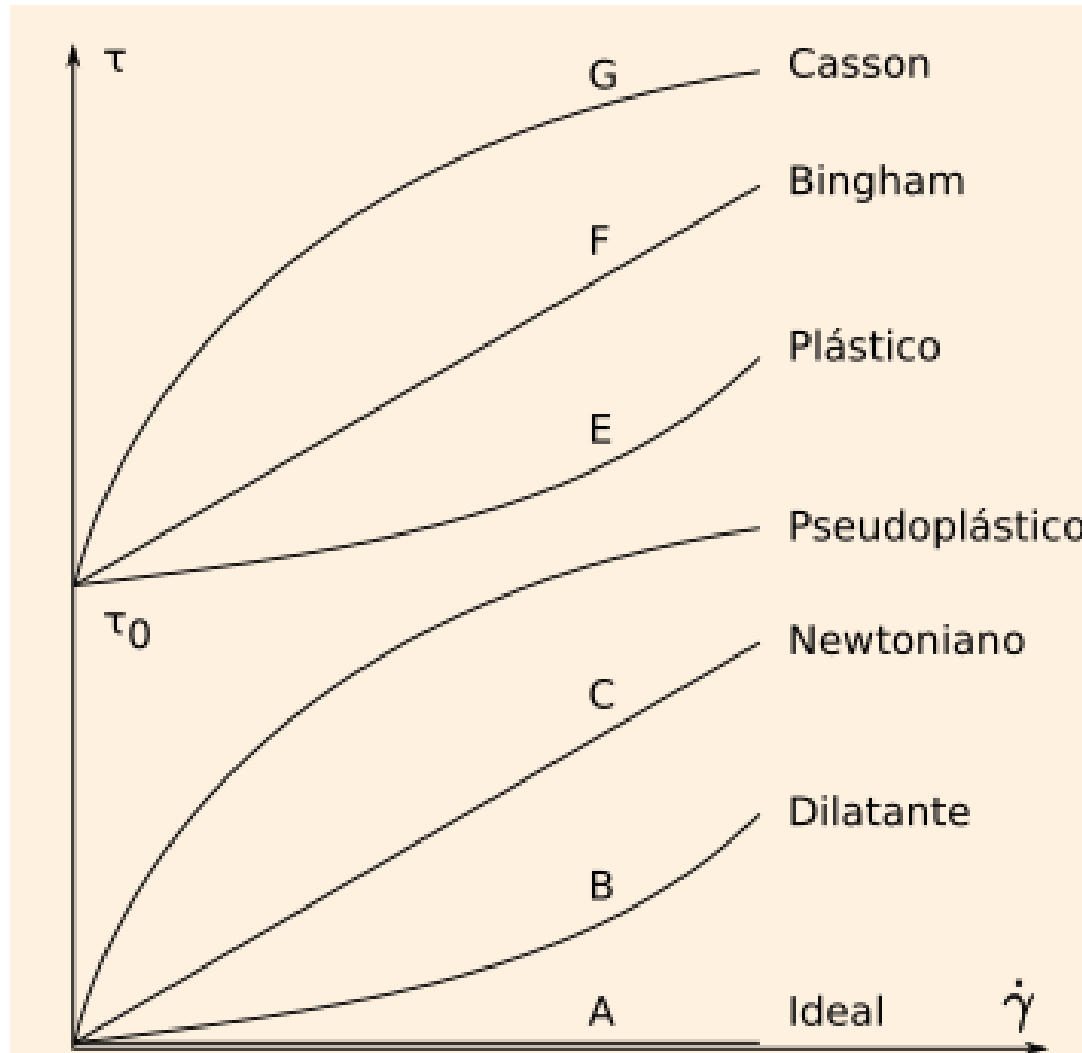
**Fluido tixotrópico:** diminui a viscosidade com o tempo, após a taxa de deformação se aumentada.

São fluidos que apresentam queda da viscosidade com o tempo quando submetido a uma dada deformação constante. Seu valor retorna ao inicial quando a deformação é interrompida, i.e., a variação de viscosidade é reversível. Exemplo desses fluidos são suspensões concentradas, emulsões e tintas, ketchup, gel para cabelo, mel (dependendo das condições).

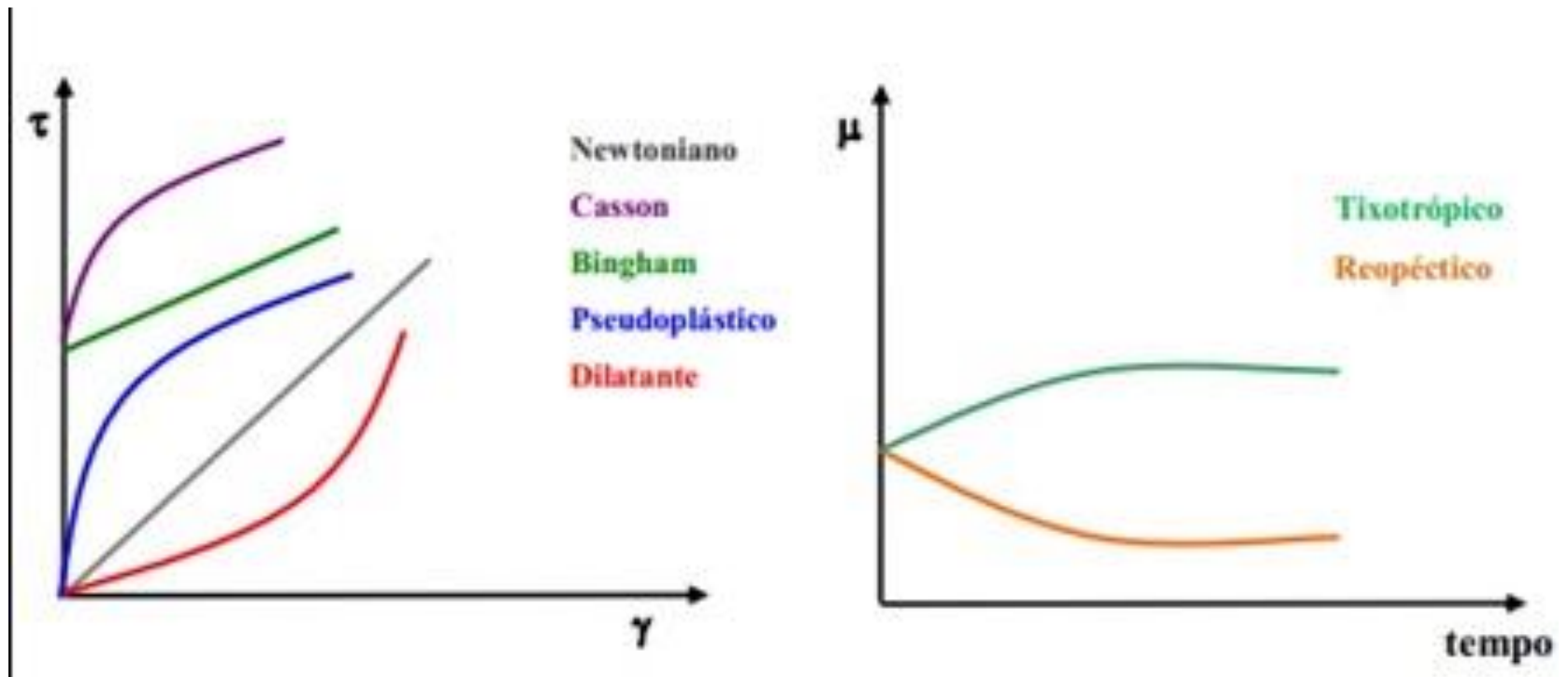




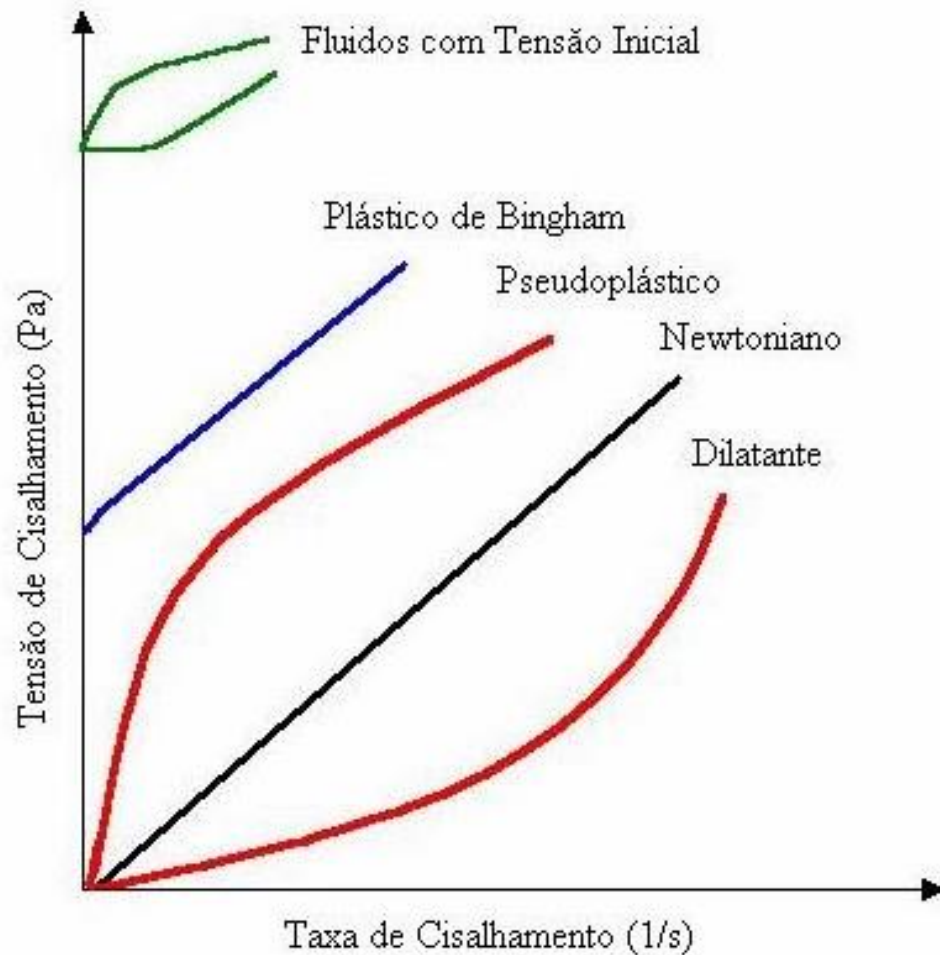


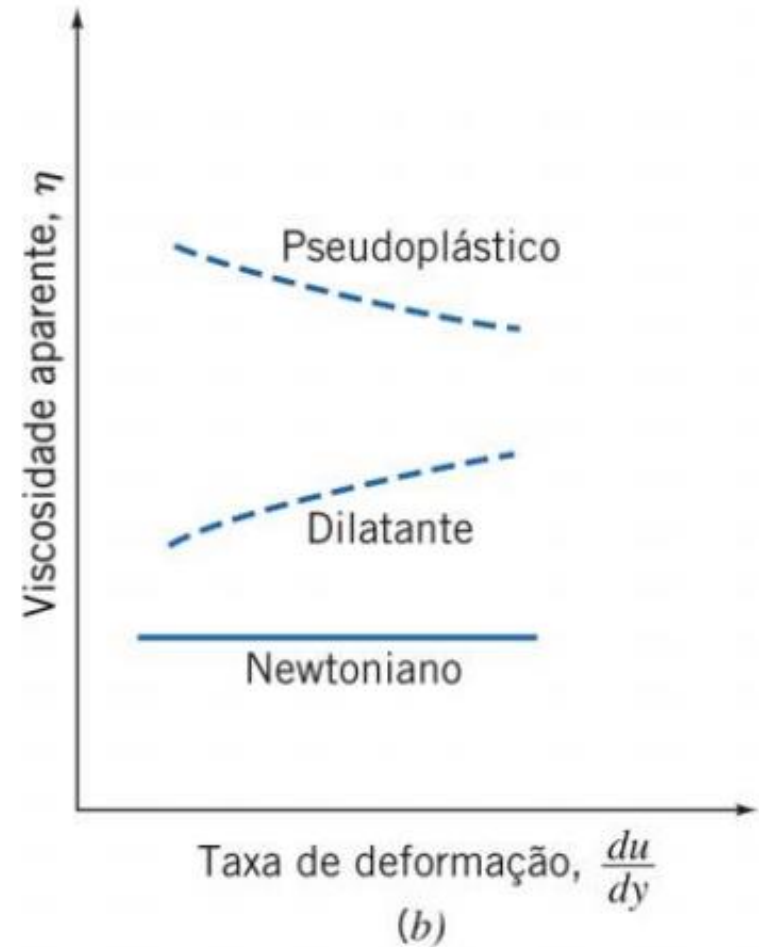
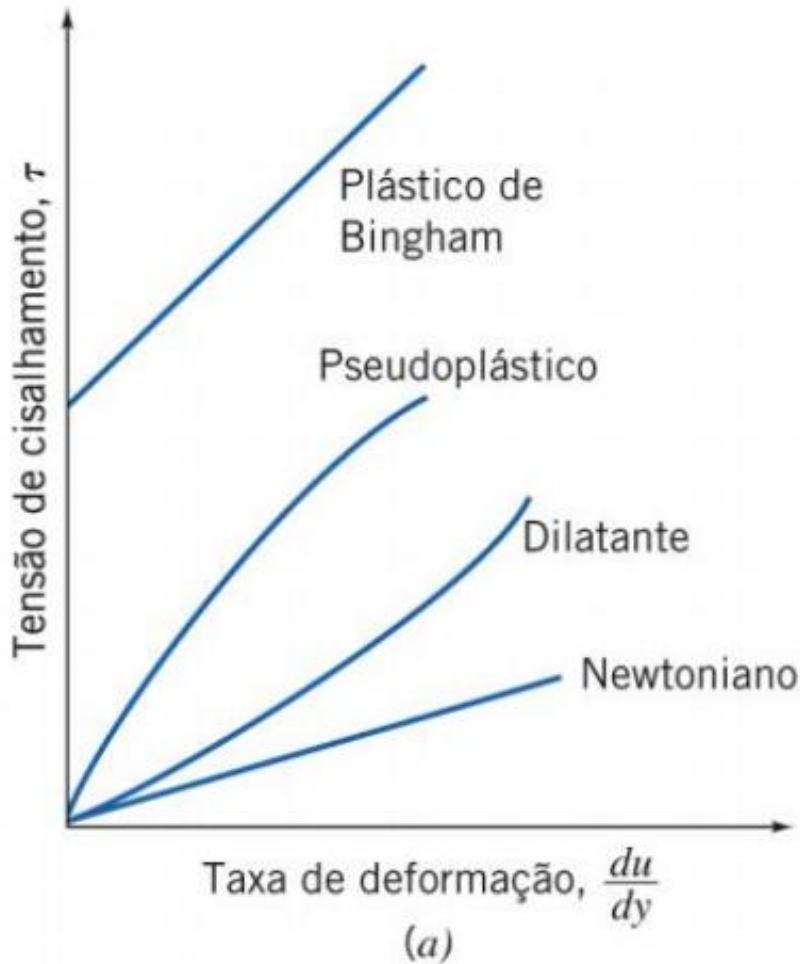


**G: o modelo de Casson** mostra características plásticas, com redução da viscosidade no aumento da taxa de cisalhamento. Aplicável a fluidos como sangue e iogurtes.









(a) Tensão de cisalhamento,  $\tau$ , (b) viscosidade aparente,  $\eta$ , como uma função da taxa de deformação para o escoamento unidimensional de vários fluidos não newtonianos.



## VISCOSIDADE ABSOLUTA OU DINÂMICA

A lei de Newton da viscosidade impõe uma proporcionalidade entre a tensão de cisalhamento e o gradiente da velocidade. Tal fato leva à introdução de um coeficiente de proporcionalidade na equação apresentada anteriormente.

Tal coeficiente será indicado por  $\mu$  e denomina-se viscosidade absoluta ou dinâmica. A equação ficará então:

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



A viscosidade é a propriedade pela qual um fluido oferece resistência ao cisalhamento.

Essa grandeza  $\mu$  é uma propriedade de cada fluido e de suas condições, como, por exemplo, a pressão e, principalmente, a temperatura.

A viscosidade de um líquido diminui com a temperatura ( $\uparrow T \Rightarrow \downarrow \mu_{\text{líquido}}$ )

A viscosidade de um gás aumenta com a temperatura ( $\uparrow T \Rightarrow \uparrow \mu_{\text{gás}}$ )

Para pressões moderadas, a viscosidade é independente da pressão e depende somente da temperatura.



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



De uma forma mais prática: *Viscosidade é a propriedade que indica a maior ou a menor dificuldade de o fluido escoar (escorrer).*

As unidades da viscosidade podem ser obtidas por análise dimensional a partir da lei de Newton da viscosidade, adotando como grandezas fundamentais F L T.



## ↳ **Simplificação prática**

Viu-se que a lei de Newton da viscosidade é escrita da seguinte forma:

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

onde  $dv/dy$  é o gradiente da velocidade ou variação de  $v$  com  $y$

(Figura 1.6)

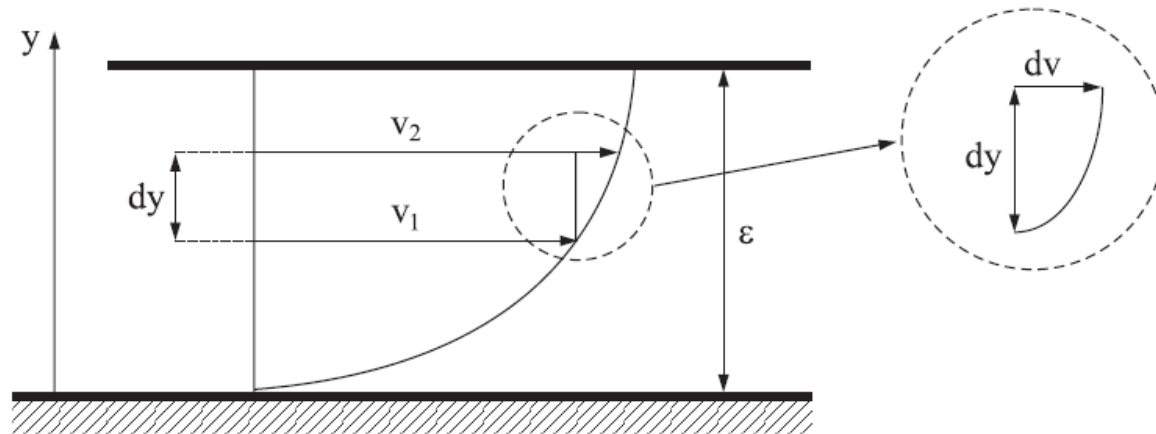


Figura 1.6

Pela figura, observa-se que, a um deslocamento  $dy$ , na direção do eixo  $y$ , corresponde uma variação  $dv$  da velocidade.

Quando a distância  $\varepsilon$  é pequena, pode-se considerar, sem muito erro, que a variação de  $v$  com  $y$  seja linear (Figura 1.7)

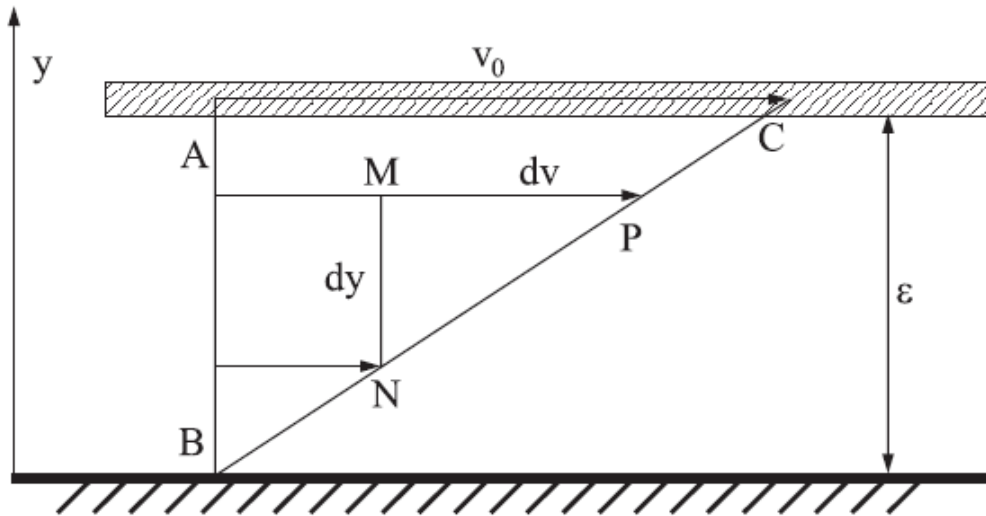


Figura 1.7

A simplificação que resulta desse fato é a seguinte:

$$\Delta ABC \approx \Delta MNP$$





**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



Logo:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{v_0}{\varepsilon}$$

Ou, de uma forma mais geral:

$$\frac{dv}{dy} = \frac{\Delta v}{\Delta y}$$



Ficando a lei de Newton:

$$\tau = \mu \frac{\Delta v}{\Delta y} = \mu \frac{v_0}{\varepsilon}$$

Esse fato leva a simplificações importantes nos problemas, evitando hipóteses e integrações às vezes complicadas.



## **OBSERVAÇÕES:**

- ✓ De forma simplificada, pode-se dizer que a viscosidade dos fluidos é originada por uma coesão entre as moléculas e pelos choques entre elas.
- ✓ A viscosidade, portanto, não é uma propriedade observável num fluido em repouso, pois, qualquer que seja a força tangencial, ele se deforma. Com o movimento do fluido, porém, ela faz sentir seu efeito, criando as condições para equilibrar a força  $F_t$  externa.



## **OBSERVAÇÕES:**

✓ Pode-se dizer, então, que viscosidade dinâmica é a propriedade dos fluidos que permite equilibrar, dinamicamente, forças tangenciais externas quando os fluidos estão em movimento.

✓ Matematicamente,  $\mu$  é a constante de proporcionalidade da lei de Newton da viscosidade.