



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

# ENGENHARIA DE MATERIAIS

## Mecânica dos Fluidos e Reologia

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

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

[srmontoro@dequi.eel.usp.br](mailto:srmontoro@dequi.eel.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**



## **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.



# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## Escola de Engenharia de Lorena – EEL

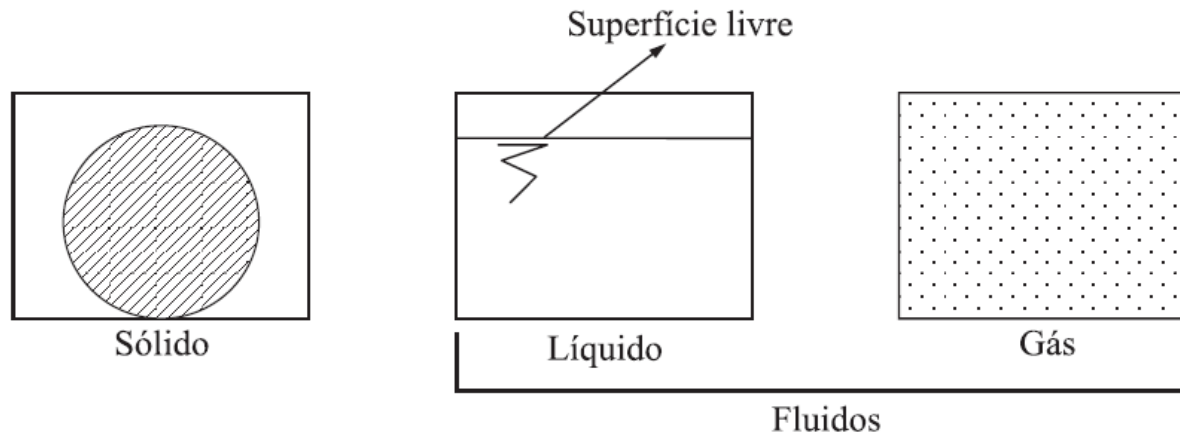


Figura 1.1

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.



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

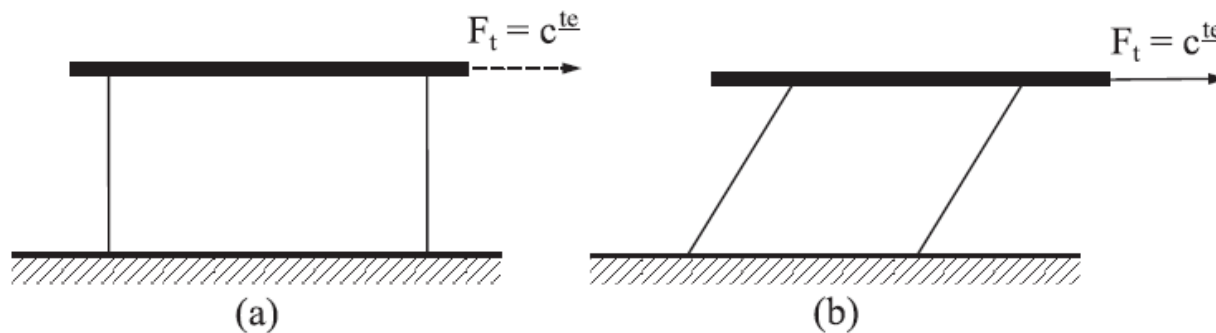
Se o problema fundamental fosse apenas reconhecer os fluidos, a definição apresentada seria perfeitamente suficiente para essa finalidade.

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.



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

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).

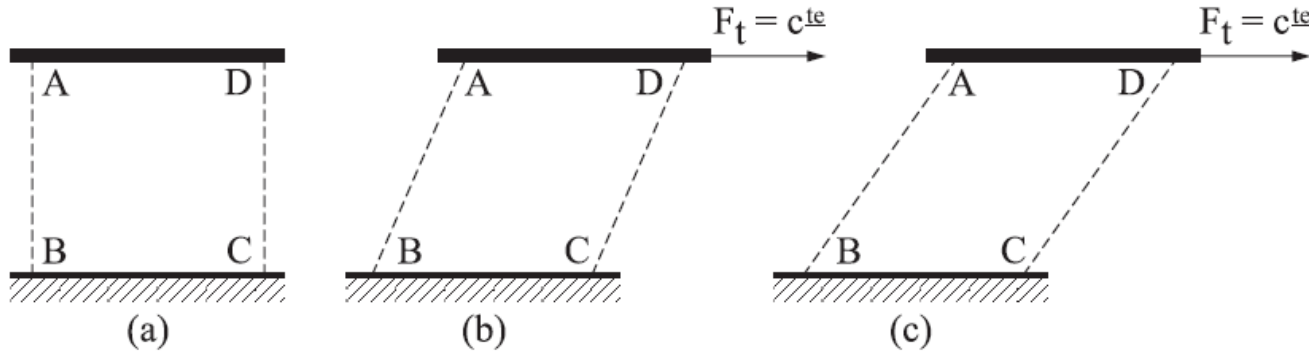


Figura 1.3

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.

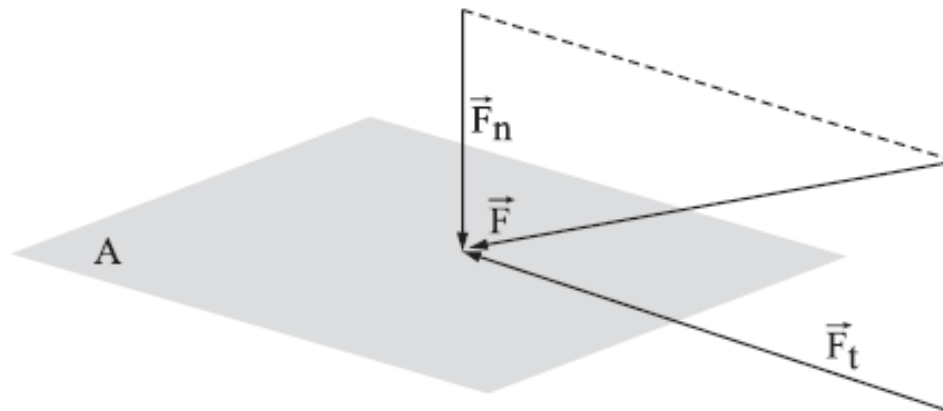


Figura 1.4



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

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 kgf/m<sup>2</sup> do sistema MK\*S (Técnico), o dina/cm<sup>2</sup> (CGS) e o N/m<sup>2</sup> (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  $y$ .



# UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

## Escola de Engenharia de Lorena – EEL

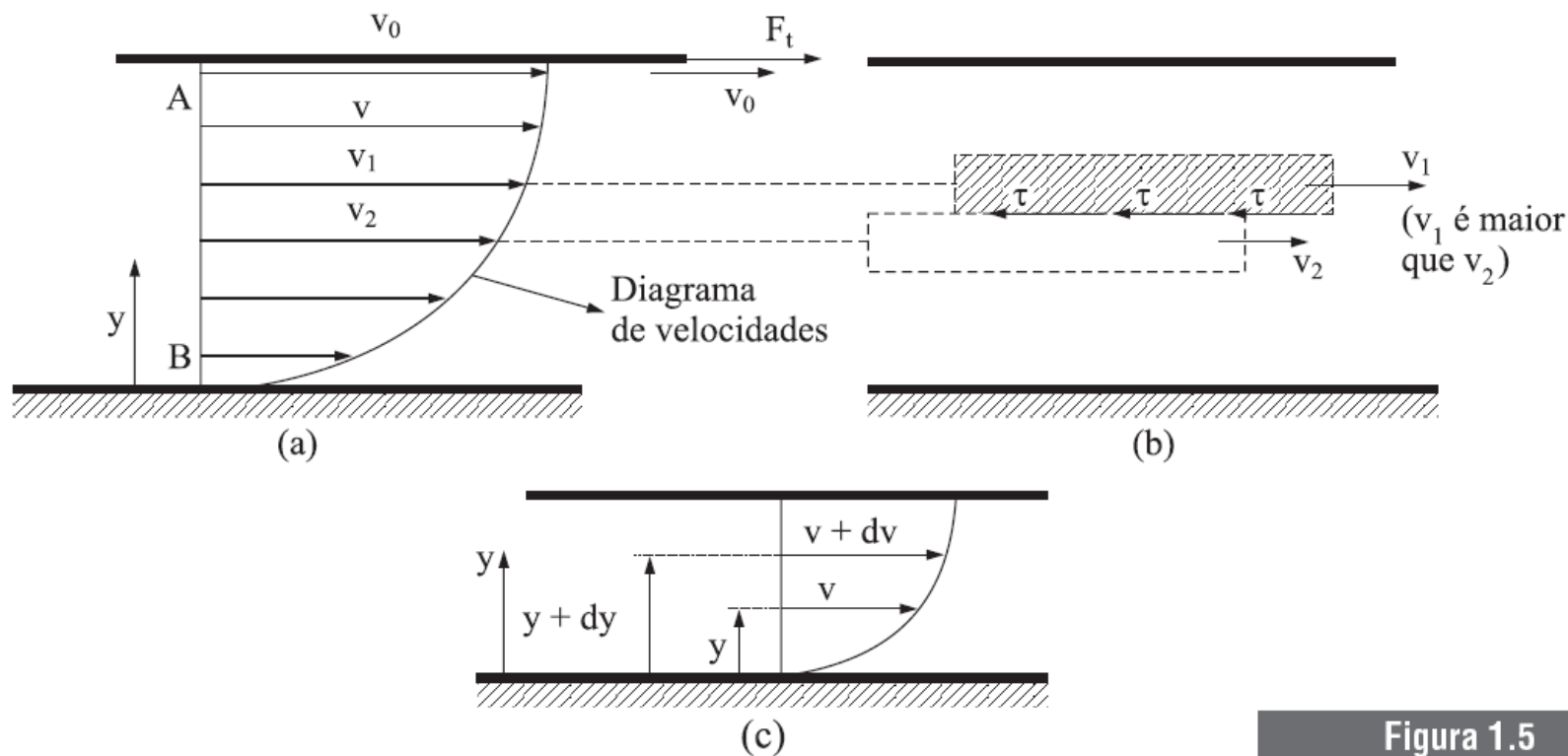


Figura 1.5



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

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

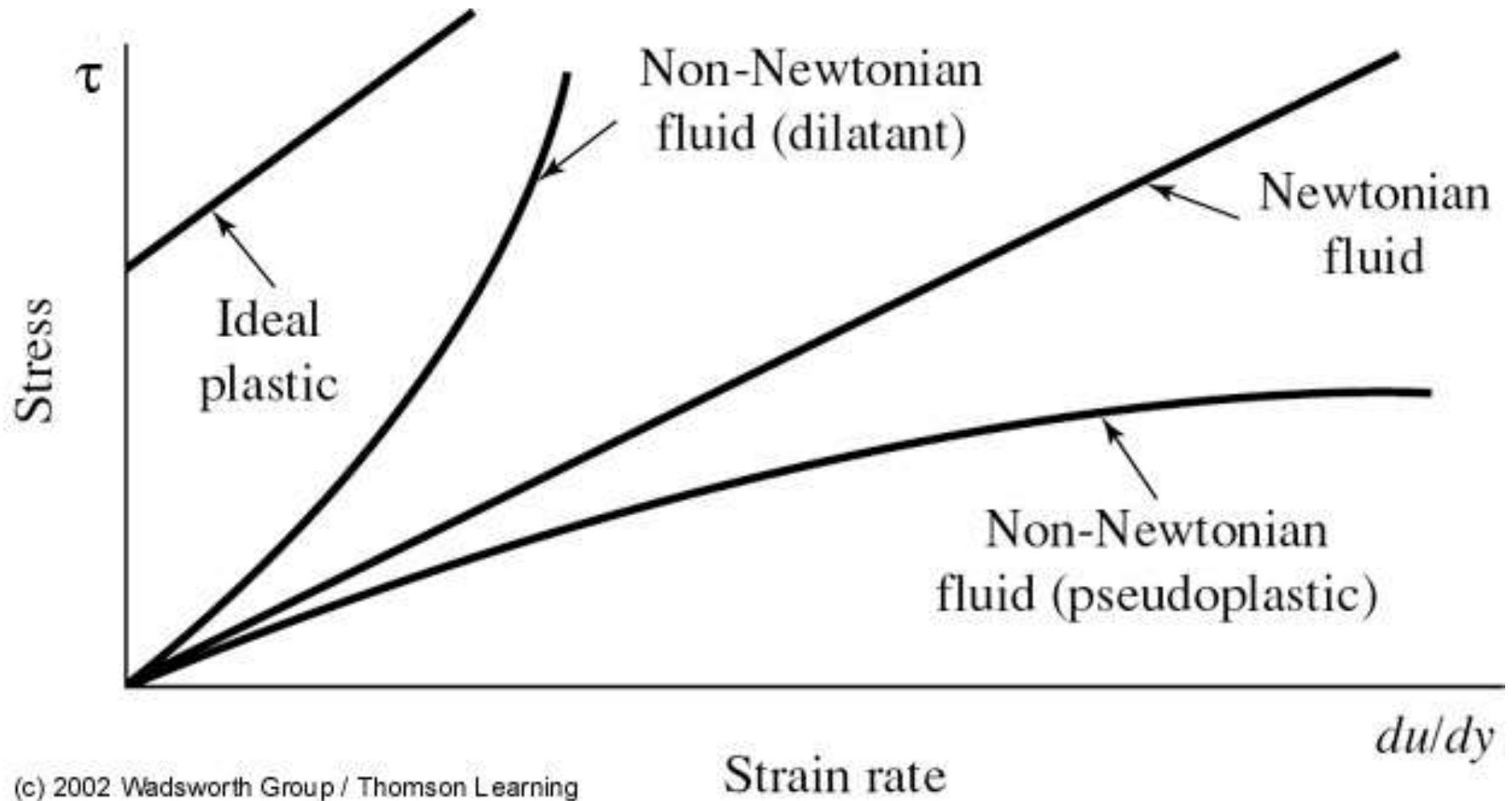
$$\tau \propto \frac{dv}{dy} \quad \text{ou} \quad \frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} = cte$$

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.

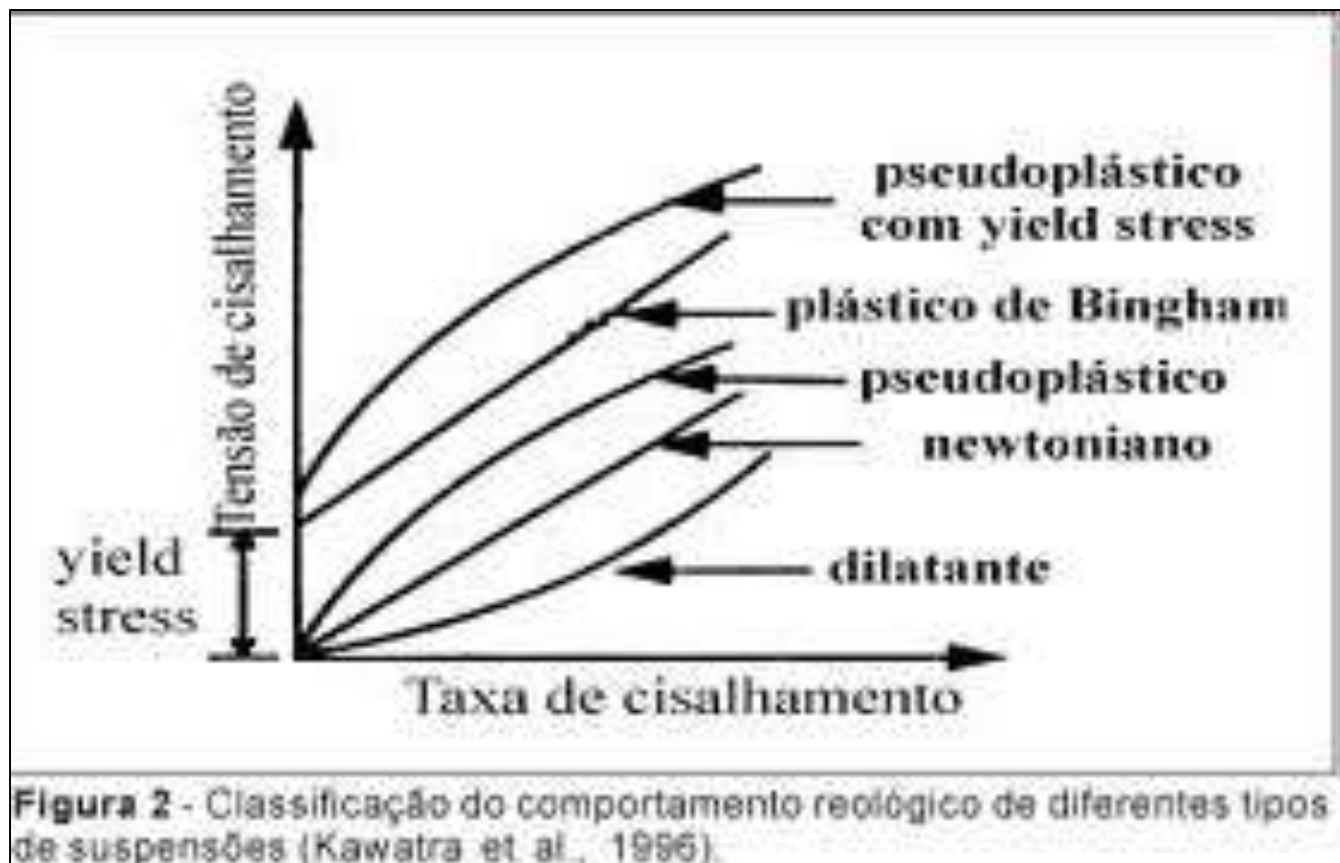


**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**





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





## **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:

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



## UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

### Escola de Engenharia de Lorena – EEL

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:

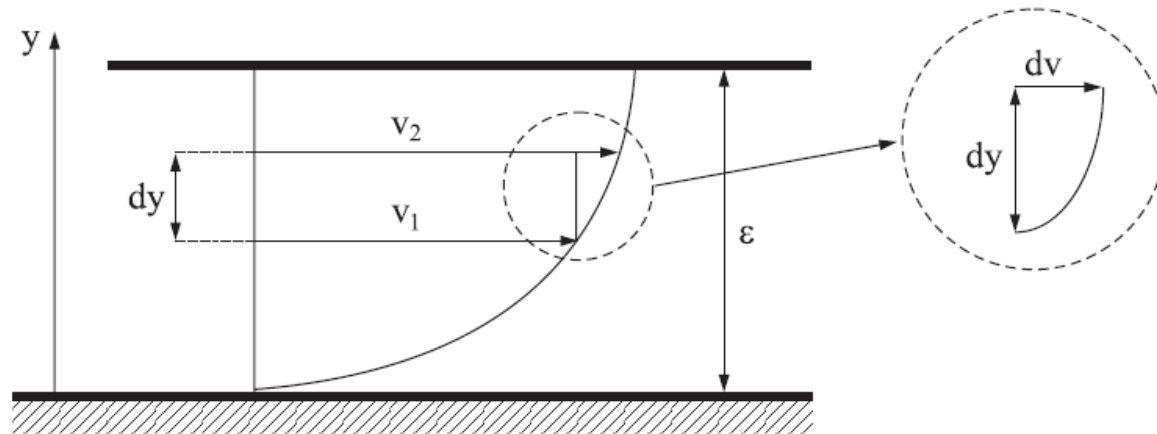
$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

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

(Figura 1.6)



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



**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)

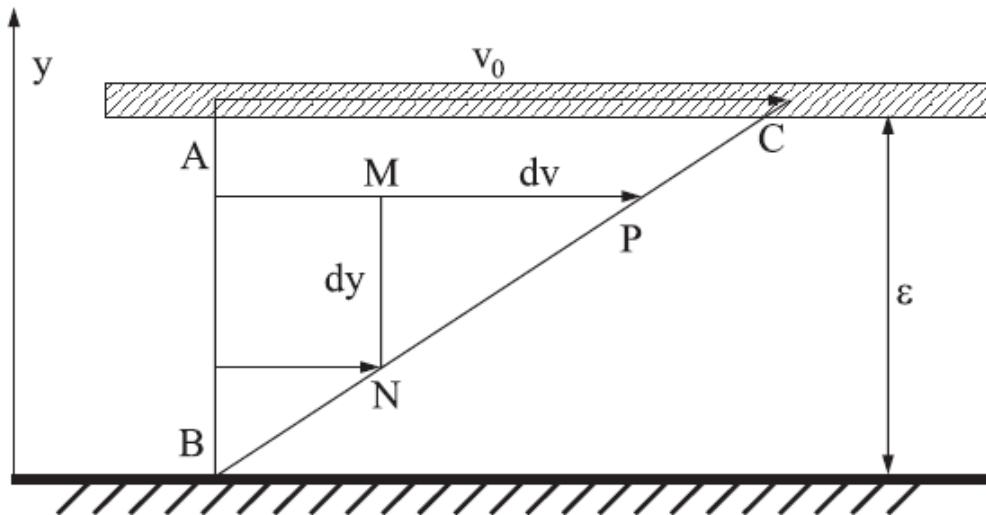


Figura 1.7

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:

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



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

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.