

Universidade de Brasília  
Faculdade de Tecnologia  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Disciplina: Mecânica dos Fluidos II  
Professores: Francisco Ricardo da Cunha / Gesse A. Roure  
Monitores: Igor Dal Osto Pereira / Guilherme Mendonça Luz

# ROTEIRO EXPERIMENTAL

## VISCOSIDADE

# 1 INTRODUÇÃO TEÓRICA

Fluidos são materiais que se deformam continuamente quando submetidos a uma tensão de cisalhamento, sendo assim diferenciados dos sólidos, que são materiais que se deformam de um valor fixo para uma dada tensão.

Segundo a lei da viscosidade de Newton, a tensão exercida sobre o líquido é proporcional à velocidade com que as partes do líquido se deslocam umas em relação as outras, isto é, proporcional ao gradiente de velocidade (ou taxa de deformação). Assim, suponha o escoamento de um líquido entre duas placas paralelas distanciadas de uma altura  $d$ . A placa superior se desloca com velocidade  $U$  e a inferior está fixa (figura 1.1).

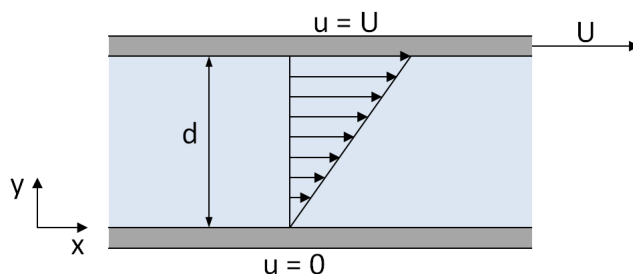


Figura 1.1: Cisalhamento simples entre placas paralelas. O escoamento é unidirecional (laminar) em que uma lâmina de fluido desliza paralelamente com relação a outra. A placa superior desloca-se com velocidade tangencial  $U$  e inferior é fixa. O escoamento se dá em regime permanente e é incompressível.

A tensão de cisalhamento  $\tau$  é dada por:

$$\tau \propto U/d \Rightarrow \tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1.1)$$

em que  $\dot{\gamma}$  é a taxa de cisalhamento em qualquer ponto do fluido e é uma razão entre a velocidade da placa superior e a distância entre as placas. A constante de proporcionalidade  $\mu$  é denominada viscosidade. No sistema SI a viscosidade possui unidade de  $Pa.s$ , e uma unidade comumente utilizada é o *Poise (P)*, sendo que  $1 cP = 1 mPa.s$ .

Para os fluidos newtonianos (ou lineares), como a água, a glicerina e o óleo de soja,  $\mu$  é uma constante que depende apenas das propriedades físicas do fluido, como a temperatura. A razão entre a viscosidade dinâmica e a massa específica  $\rho$  do fluido

é deno minada viscosidade cinemática ( $\nu$ ) ou coeficiente de difusão molecular hidrodinâmico. A viscosidade dinâmica mede, em termos efetivos, a eficiência de transporte de quantidade de movimento ou vorticidade entre camadas adjacentes de um fluido quando sujeito a cisalhamento. De outra maneira pode-se interpretar a viscosidade do fluido como a resistência que o mesmo tem à forças tangenciais aplicadas.

A viscosidade dinâmica de fluidos newtonianos varia com a temperatura segundo a lei de Arrhenius:

$$\mu = Ae^{B/T}, \quad (1.2)$$

em que  $T$  é a temperatura absoluta e  $A$  e  $B$  são constantes do fluido. Enquanto que para gases a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura, já que uma flutuação típica de velocidade molecular é proporcional a  $\sqrt{T}$ , nos líquidos, em que as moléculas possuem mobilidade bem menor, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura. Nesse caso, o mecanismo preponderante para transportar quantidade de movimento por flutuações moleculares é a coesão molecular, praticamente inexistente em gases diluídos.

Na natureza e na indústria são também encontrados diversos fluidos que não apresentam esse comportamento linear. Fluidos como soluções poliméricas, sangue, suspensões e emulsões apresentam viscosidade dependente da taxa de cisalhamento. Esses fluidos são denominados não-newtonianos viscosos ou simplesmente newtonianos generalizados nos quais existe uma dependência da viscosidade dinâmica com a taxa de cisalhamento, mas os mesmos não apresentam efeitos elásticos, diferenças de tensões normais e como os fluidos newtonianos são também instantâneos (i.e. sem memória). Neste caso a tensão se relaciona com a taxa de cisalhamento da seguinte maneira:

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma}. \quad (1.3)$$

A viscosidade dinâmica depende além da temperatura de uma propriedade do escoamento e nessas circunstâncias é denominada viscosidade aparente do fluido não-newtoniano viscoso.

Um dos modelos *ad hoc* mais usados para caracterizar a viscosidade aparente de um fluido newtoniano generalizado foi proposto por Ostwald (fluido “power law”) e é dado pela seguinte correlação empírica:

$$\mu(\dot{\gamma}) = c\dot{\gamma}^{n-1}. \quad (1.4)$$

em que  $c$  e  $n$  são constantes do fluido determinadas experimentalmente. É importante notar que substituindo a equação (1.4) em (1.3), obtém que

$$\tau = c\dot{\gamma}^n, \quad (1.5)$$

o que resulta realmente em uma dependência não linear entre a tensão e a taxa de deformação. Note que quando  $c = \mu$  constante e  $n = 1$ , o modelo recupera a condição linear puramente newtoniana. Quando  $n < 1$  os fluidos são denominados não-newtonianos pseudo-plásticos e quando  $n > 1$  não-newtonianos dilatantes. A figura (1.2) mostra o comportamento desses fluidos.

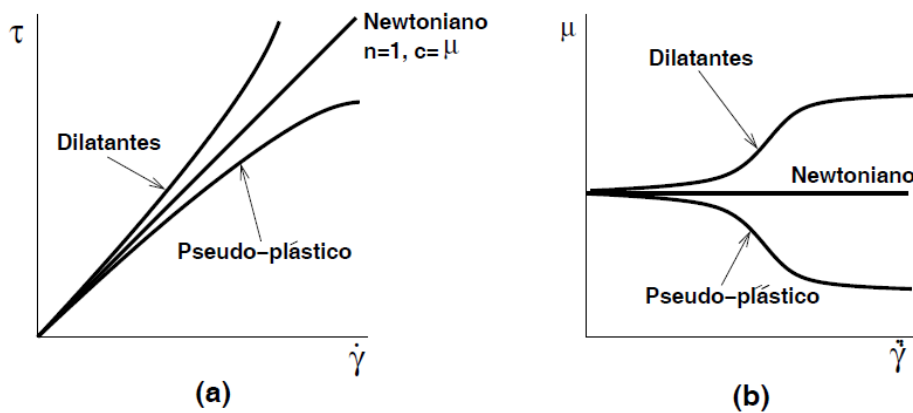


Figura 1.2: Comportamento de um fluido não-newtoniano em que a viscosidade aparente segue a lei de potência (*power-law*). (a): tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento. (b): viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento.

## 1.1 OBJETIVOS

Este experimento tem por objetivo a familiarização do aluno com diferentes formas de medir a viscosidade de fluidos newtonianos e não-newtonianos. Serão medidas as viscosidades dos seguintes fluidos:

- Água
- Etileno Glicol
- Óleo Mineral
- Solução de Poliacrilamida.

As medições de viscosidade serão realizadas utilizando-se os seguintes aparatos e instrumentos do Laboratório de Microhidrodinâmica e Reologia - VORTEX:

- Cannon-Fenske
- Viscosímetro de Cilindros Concêntricos

## 1.2 CANNON-FENSKE

O Cannon-Fenske é basicamente um tubo em U disposto na vertical, como mostra a figura (1.3).

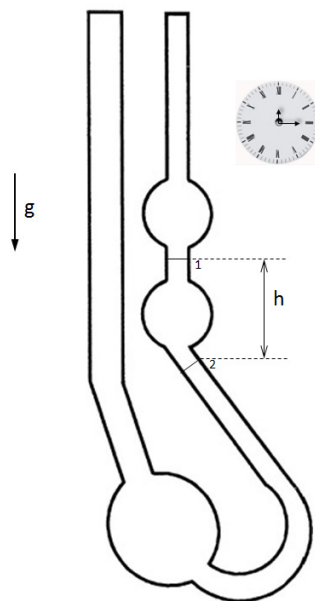


Figura 1.3: Esquema ilustrativo do aparato Cannon-Fenske. Aqui  $g$  é a aceleração da gravidade local.

De um lado é formado por um tubo capilar e do outro é composto por um tubo de maior diâmetro. A medição da viscosidade é feita através da medição do tempo que o fluido leva para escoar entre as marcas 1 e 2. A diferença de pressão devido à altura  $h$  entre 1 e 2 ( $\Delta P$ ) é igual a soma das pressões perdidas pelo fluido devido a aceleração na entrada do tubo até ser atingido o perfil parabólico e as perdas por atrito ao longo do capilar.

No entanto, dado que trata-se de um tubo capilar (pequeno diâmetro), submetido a uma pequena velocidade de escoamento, é razoável admitir que o número de Reynolds é suficientemente pequeno para que o termo de queda de pressão associado ao

desenvolvimento do escoamento no início do tubo seja desprezado. Com isso, temos que:

$$\Delta P = \rho g \Delta h = \frac{V}{\Delta t} \frac{128 \mu L}{\pi d^4} \quad (1.6)$$

Isolando a viscosidade cinemática, temos:

$$\nu = \left( \frac{\pi g \Delta h d^4}{128 L V} \right) \Delta t = K \Delta t \quad \text{com} \quad K = \left( \frac{\pi g \Delta h d^4}{128 L V} \right). \quad (1.7)$$

A constante  $K$  é fornecida pelo fabricante na tabela 1 (ver apêndice 1 para detalhes), incluindo os intervalos da viscosidade cinemática associada a cada numeração do viscosímetro Cannon-Fenske. A viscosidade deve obedecer ao intervalo associado para que o fluido com uma determinada viscosidade escoe no capilar apropriado a uma velocidade ou vazão suficientemente pequena tal que a condição acima para  $\Delta t$  seja atendida e o erro dessa aproximação seja o menor possível.

### 1.2.1 Aparato Experimental e Procedimentos

Os instrumentos usados nessa etapa são:

- Densímetro - Marca: Specific Gravity, ERTO CO. ASTM 86
- Viscosímetro Cannon-Fenske - Marca: Induchem LAB Glass CO.
- Banho Térmico - Marca: Cannon; modelo CT-2000
- Cronômetro - Marca: Cronobio; modelo SW2018

Com este instrumento serão determinadas as viscosidades dos óleos de soja e mineral em função da temperatura. Primeiro é feita a medição da massa específica do fluido no densímetro. O fluido é então colocado no Cannon-Fenske previamente selecionado. O Cannon-Fenske é colocado dentro do banho térmico e é selecionada a temperatura em que se deseja medir a viscosidade. É necessário aguardar em torno de 15 minutos para que o fluido entre em equilíbrio térmico com a temperatura escolhida (segundo o fabricante). Então, é feita a medida do tempo que o fluido leva para escoar entre os pontos A e B. Com esse  $\Delta t$  em segundos e a constante do viscosímetro utilizado é possível determinar ou calcular a viscosidade cinemática do fluido. Multiplicando esse valor pela massa específica do fluido encontramos a sua viscosidade dinâmica.

### 1.3 VISCOSÍMETRO DE CILINDROS CONCÊNTRICOS

O referido viscosímetro baseia-se no escoamento laminar no espaçamento entre dois cilindros rotativos. Quando o espaçamento entre os cilindros é pequeno o suficiente, o líquido de trabalho entre os mesmos experimenta sempre uma taxa constante de cisalhamento  $\dot{\gamma}$  (Figura 1.4).

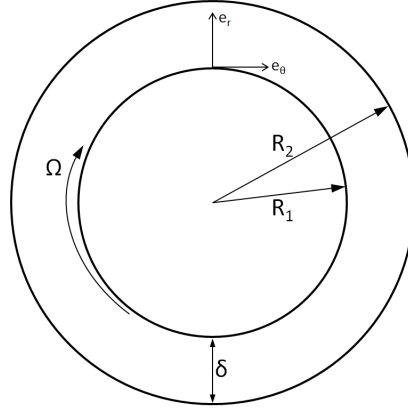


Figura 1.4: Esquema do escoamento entre cilindros rotativos. O cilindro maior de raio  $R_2$  permanece fixo enquanto o cilindro menor de raio  $R_1$  gira com velocidade  $\omega$ . O fluido ocupa o espaço entre os cilindros  $\delta$ .

Seja  $R_1$  o raio do cilindro interno,  $R_2$  o raio do cilindro externo e  $\omega$  a velocidade angular do cilindro interno (com o externo estacionário), a taxa de cisalhamento é determinada por:

$$\dot{\gamma} = \frac{R_1\omega}{R_2 - R_1} \quad (1.8)$$

Sendo  $T$  o torque do fluido sobre o cilindro de Raio  $R_1$ , a tensão de cisalhamento é dada por:

$$\tau_{r\theta} = \frac{T}{2\pi R_1^2 L} \quad (1.9)$$

em que  $L$  é o comprimento do cilindro imerso no líquido. Igualando-se a equação constitutiva para fluido newtoniano (equação 1.1), a expressão da tensão de cisalhamento é dada por:

$$\tau_{r\theta} = \mu\dot{\gamma} = \frac{T}{2\pi R_1^2 L} \Rightarrow \mu = \frac{T}{2\pi R_1^2 L\dot{\gamma}}. \quad (1.10)$$

E, portanto, obtém-se a seguinte expressão para a viscosidade do fluido:

$$\mu = \frac{T(R_2 - R_1)}{2\pi R_1^3 L\omega}. \quad (1.11)$$

Assim, para uma dada velocidade angular de rotação do cilindro interno é possível obter a viscosidade do fluido medindo-se o torque do fluido aplicado sobre este cilindro. Com esse mesmo aparato é possível medir também viscosidades aparentes de fluidos não newtonianos.

No viscosímetro de cilindros concêntricos, o torque é medido através de uma mola de torção acoplada à haste do cilindro interno rotativo. Um transdutor de deslocamento é conecta a mola a uma ponte de Wheatstone. Conforme o torque produz uma deformação angular na mola de torção, a resistência do transdutor é modificada, o que, por sua vez, retira a ponte de seu estado de equilíbrio, fazendo com que a diferença de potencial entre seus polos seja diferente de zero. Este sinal é, então, convertido em um valor de torque através do sistema digital do viscosímetro.

### **1.3.1 Aparato Experimental e Procedimentos**

O aparato utilizado nessa etapa do experimento é composto por:

- Viscosímetro de Couette - Marca: Brookfield, PROGAMMABLE DV-II + VIS-COSIMETER
- Computador - com os softwares VBLOADER e WINGATHER
- Pipeta graduada - Marca: Costar, 20°C 5ML.

Com a pipeta são colocados 8 *ml* do líquido que se deseja medir no viscosímetro. É aberto então o software VBLOADER para entrar com os parâmetros do experimento, como a velocidade angular e o tempo de execução. O software WINGATHER armazena os dados em um arquivo de texto. Com esse arquivo são obtidos os dados principais do experimento. A figura(1.5) mostra o viscosímetro utilizado. Com esse viscosímetro serão avaliadas as viscosidades do etileno glicol, do óleo mineral, da glicerina e da solução de poliacrilamida em função da taxa de cisalhamento.





Figura 1.5: Viscosímetro Brookfield de cilindros concêntricos utilizado nos experimentos. (Laboratório do Vortex - ENM - UnB)

## 1.4 RELATÓRIO

O relatório deverá conter os seguintes elementos:

1. Introdução teórica
2. Descrição dos experimentos
3. Resultados Cannon-Fenske: apresentar os gráficos da viscosidade da água, do etileno glicol e do óleo mineral em função da temperatura e comparar com a Lei de Arrhenius, obtendo as constantes  $A$  e  $B$  para cada material
4. Resultados Viscosímetro de Cilindros Concêntricos: apresentar os gráficos do etileno glicol, do óleo mineral e da solução de poliacrilamida em função da taxa de cisalhamento. Caso verifique-se um comportamento pseudo-plástico para algum dos fluidos analisados, utilize um modelo Power Law para realizar o ajuste dos pontos experimentais obtidos, determinando as constantes  $n$  e  $C$  para esse fluido. Compare o valor da viscosidade obtida para o etileno glicol e para o óleo mineral por este viscosímetro, com aquelas obtidas no Cannon-Fenske (para a mesma temperatura).

5. Conclusões: analisar brevemente os experimentos realizados e classificar os fluidos estudados como newtonianos ou não newtonianos, expondo os argumentos para essa classificação.

## **BIBLIOGRAFIA**

Barnes, H. A., Hutton, J. F., Walters K., 1989, “An Introduction to Rheology”, 1. ed - Elsevier Science

Morrison, F. A. “Understanding Rheology”, Oxford University Press. New York, 2001.

Cengel, Y. A., Cimbala, J. M., 2007, “Mecânica dos Fluidos - Fundamentos e Aplicações”, 1 ed. - Editora McGrawHill

Cunha, F. R., 2010, “Notas de aula do curso de Mecânica dos Fluidos 2”, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Mecânica

Larson, R. G., 1999, “The structure and rheology of complex fluids”, 1 ed. - Oxford University Press.

Pao, R. H. F., 1967, “Fluid Dynamics”, 1 ed. - Purdue University Press.

## **APÊNDICE 1**

A tabela abaixo contém as constantes de cada Cannon-Fenske e a faixa em que a viscosidade cinemática deve estar situada para que o erro relativo à aproximação que considera uma dependência linear da viscosidade cinemática com o  $\Delta t$  seja o menor possível (dados fornecidos pelo fabricante).

Tabela 1.1: Classificação dos Viscosímetros

<b>Número</b>	<b>Constante K</b> <b>(centistokes/segundo)</b>	<b>Variação da Viscosidade</b> <b>(centistokes)</b>
25	0.002	0.5 a 2
50	0.004	0.8 a 4
75	0.008	1.6 a 8
100	0.015	3 a 15
150	0.035	7 a 35
200	0.1	20 a 100
300	0.25	50 a 250
350	0.5	100 a 500
400	1.2	240 a 1200
450	2.5	500 a 2500
500	8	1600 a 8000
600	20	4000 a 20000

## **2 NORMAS DE SEGURANÇA - LABORATÓRIO DE MECÂNICA DOS FLUIDOS - GRUPO VORTEX**

Os experimentos de medição de viscosidade serão realizados nas dependências do Laboratório de Mecânica dos Fluidos do Grupo Vortex, localizado no térreo do Prédio SG-09.

O laboratório conta com dispositivos frágeis e de elevado custo, além de vidrarias e algumas substâncias tóxicas. Em função disso, para evitar possíveis acidentes, pede-se que as seguintes normas de segurança sejam rigorosamente seguidas:

- Utilizar calça jeans ou similar;
- Utilizar calçado fechado;
- Manusear amostras de fluido somente com o uso de luvas de latex;
- Operar qualquer aparelho somente com a autorização do monitor;
- Não comer ou beber nas dependências do laboratório;
- Evitar conversas paralelas que provoquem desatenção durante a realização dos experimentos;
- Posicionar mochilas e pertences em local a ser designado pelo monitor.