

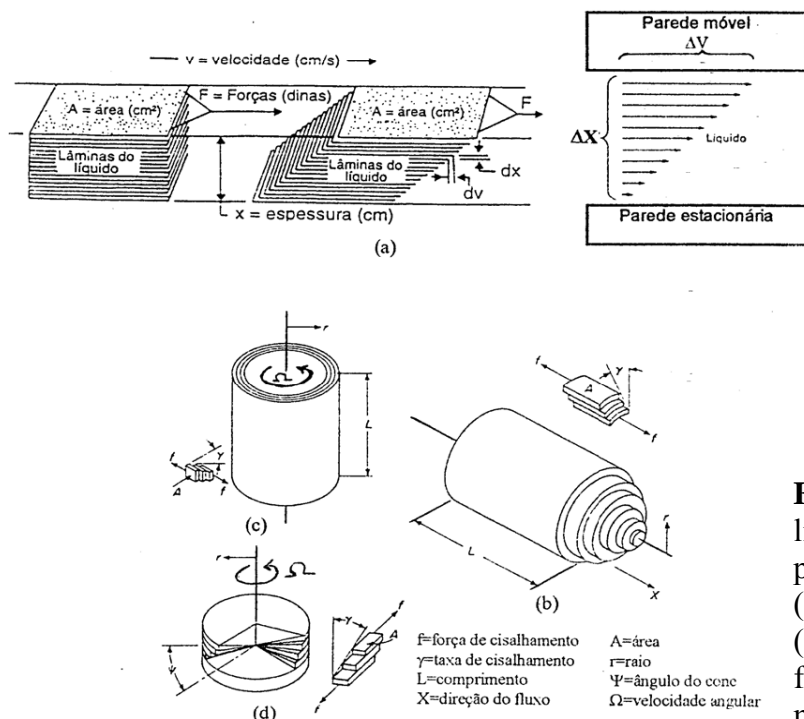
## Prática 4 – Determinação da Viscosidade de Líquidos.

**Tipos de viscosímetros. Viscosidade relativa, viscosidade intrínseca e viscosidade. Influência da concentração e da temperatura na viscosidade de líquidos.**

Objetivos: Aprender o que significa viscosidade; Identificar os tipos de viscosímetros existentes; Determinar experimentalmente a viscosidade relativa e a viscosidade intrínseca de **soluções de glicerol e de ácido fórmico**. Verificar a dependência da viscosidade com a concentração e com a temperatura utilizando um viscosímetro capilar do tipo Ubbelohde. Determinar a viscosidade do glicerol e do ácido fórmico à temperatura de 40° C.

### 1) Introdução

A ciência que estuda a viscosidade dos líquidos, também chamada de reologia, é a parte da físico-química que investiga as propriedades e o comportamento mecânico de corpos que sofrem uma deformação (sólidos elásticos) ou um escoamento (fluido: líquido ou gás) devido à ação de uma tensão de cisalhamento (num corpo sujeito a uma força cortante, força por unidade de área da seção transversal do corpo – veja figura 1). Muitos sistemas, principalmente os de natureza coloidal\* apresentam um comportamento intermediário entre esses dois extremos, apresentando tanto características viscosas como elásticas. Esses materiais são chamados de viscoelásticos.



**Figura 1.** Modelo do fluxo laminar em um líquido. (a) viscosímetro hipotético de paredes paralelas; (b) viscosímetro capilar; (c) viscosímetro de cilindros concêntricos (cilindro interno móvel; cilindro externo fixo); (d) viscosímetro de cone-placa (cone móvel; placa fixa).

\*Sistemas nos quais um ou mais dos componentes apresentam pelo menos uma de suas dimensões dentro do intervalo de 1 nm a 1 µm, o que inclui tanto moléculas de polímeros de alta massa molar como pequenas partículas em suspensão; exemplos: fumaça, poeira, leite, maionese, pasta de dente, pérola, plásticos pigmentados.

O entendimento e o controle das propriedades reológicas é de fundamental importância na fabricação e no manuseio de uma grande quantidade de materiais (borrachas, plásticos, alimentos, cosméticos, tintas, óleos lubrificantes) e em processos (bombeamento de líquidos em tubulações, moldagem de plásticos).

## 2 Viscosidade

A viscosidade de um líquido (inverso da fluidez) mede a resistência interna oferecida ao movimento relativo de diferentes partes desse líquido. Em um fluxo laminar diferentes “lâminas” do líquido movem-se com diferentes velocidades (figura 1). Em um viscosímetro capilar (figura 1b), o líquido em contato com a parede do capilar tem velocidade igual a zero, atingindo uma velocidade máxima no centro do capilar. Em um líquido muito viscoso, a velocidade varia pouco da parede para o centro do capilar e o líquido escoar lentamente. Note que a viscosidade ( $\eta$ ) é inversamente proporcional à este gradiente de velocidade, ou taxa de cisalhamento ( $\gamma$ ) (veja equação 3).

**A viscosidade mede a resistência de um líquido em fluir (escoar) e não está diretamente relacionada com a densidade do líquido, que é a relação massa/volume.** Por exemplo, o óleo de soja utilizado para cozinhar é mais viscoso que a água, embora seja menos denso. Apesar da nítida diferença entre viscosidade e densidade, é comum ouvir a frase “este líquido é muito denso” para se referir a um líquido que tem dificuldade em escoar. A frase correta deveria ser “este líquido é muito viscoso”.

Matematicamente, a viscosidade ( $\eta$ ) é a derivada do gráfico da força de cisalhamento por unidade de área entre dois planos paralelos de líquido em movimento relativo (tensão de cisalhamento,  $\tau$ ) versus o gradiente de velocidade  $dv/dx$  (taxa de cisalhamento,  $\gamma$ ) entre os planos, isto é,

$$\tau = \eta \gamma$$

onde

$$\gamma = \frac{dv}{dx} = \frac{\text{(velocidade diferencial)}}{\text{(espessura diferencial)}} \quad \text{taxa de cisalhamento} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{\text{(força)}}{\text{(área)}} \quad \text{tensão de cisalhamento} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{d\tau}{d\gamma} = \frac{F/A}{dv/dx} \quad \text{viscosidade ou coeficiente de viscosidade} \quad (3)$$

Alguns livros apresentam o gráfico da taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento. Neste caso, a derivada  $d\gamma/d\tau$  corresponde ao coeficiente de fluidez,  $\phi=1/\eta$ .

A unidade SI de viscosidade é

$$[\eta] = \frac{\text{N/m}^2}{\text{m s}^{-1}/\text{m}} = \frac{\text{N/m}^2}{\text{s}^{-1}} = \text{Pa s} \quad (\text{pascal x segundo}) \quad \text{ou simplesmente } (\text{Pa} \times \text{s})$$

Obs. no sistema CGS de unidades, a unidade de viscosidade é o poise ( $P = \text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ). Seu nome é uma homenagem a Jean-Louis-Marie Poiseuille. Comparando esta unidade com o SI temos a relação:  $1 \text{ Pa s} = 10 \text{ P}$ .

Alguns livros apresentam o gráfico da taxa de cisalhamento em função da tensão de cisalhamento. Neste caso, a derivada  $d\gamma/d\tau$  corresponde ao coeficiente de fluidez,  $\phi=1/\eta$ .

A unidade SI de viscosidade é

$$\eta = \frac{\text{N/m}^2}{\text{m s}^{-1}/\text{m}} = \frac{\text{N/m}^2}{\text{s}^{-1}} = \text{Pa s} \quad (\text{pascal x segundo})$$

A antiga unidade de viscosidade no sistema cgs é denominada “poise” (símbolo: P) e corresponde à seguinte relação: dina s/cm<sup>2</sup>. Como a viscosidade da água a 20°C é muito próxima de 1 centipoise (1 cP; valor exato: 1,002 cP) os valores de viscosidade eram freqüentemente tabelados em cP. A relação entre a atual unidade SI e a antiga unidade é 1 mPa · s = 1 cP.

Em algumas situações é conveniente usar a **viscosidade cinemática** que é o coeficiente de viscosidade dividido pela densidade do líquido,  $\nu=\eta/\rho$ . Em um viscosímetro capilar, é a viscosidade cinemática que é medida.

Se o gráfico da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento à temperatura e pressão constantes for linear, a viscosidade será constante e igual ao coeficiente angular da reta. A maioria dos líquidos puros e muitas soluções e dispersões apresentam este tipo de comportamento e são denominados **líquidos newtonianos**, pois foi Newton quem primeiro observou esta relação. A quantidade  $d\tau/d\gamma$ , no caso de sistemas newtonianos, é a viscosidade absoluta. Em um viscosímetro de Stormer, se o líquido é newtoniano, quando dobramos o peso de acionamento, a velocidade angular do cilindro interno também dobra.

Muitas soluções de polímeros (especialmente se forem concentradas) e dispersões (especialmente se contiverem partículas assimétricas, por exemplo, na formas de disco ou bastão) apresentam desvio deste comportamento e são denominadas de **sistemas não-newtonianos**. As principais causas do fluxo não-newtoniano em sistemas coloidais são a formação de uma estrutura organizada através do sistema e a orientação de partículas assimétricas na direção do fluxo provocadas pelo gradiente de velocidade (figura 2). A quantidade  $d\tau/d\gamma$ , no caso de sistemas não-newtonianos, é a viscosidade aparente,  $\eta_{ap}$ , pois seu valor depende da tensão de cisalhamento aplicada ao líquido.



**Figura 2.** Orientação de partículas na forma de bastão em um fluxo viscoso de um viscosímetro de cilindros concêntricos; cilindro externo fixo. As setas representam o gradiente de velocidade no fluxo laminar. (a) em repouso: orientação aleatória. (b) após o cisalhamento.

## FLUXO NÃO NEWTONIANO

Os sistemas não-newtonianos apresentam dois tipos de fenômenos que os distinguem de sistemas newtonianos: fenômenos independentes do tempo e fenômenos dependentes do tempo.

### 1. Fenômenos de estado estacionário (independentes do tempo)

Três classes de líquidos apresentam este comportamento e são denominados pseudoplásticos, plásticos e dilatantes.

#### 1.a Diminuição da viscosidade aparente com o aumento da tensão de cisalhamento.

Os líquidos que apresentam este comportamento são denominados **pseudoplásticos**. Para uma dada tensão de cisalhamento, a taxa de cisalhamento é menor que a do comportamento newtoniano extrapolado. As causas mais comuns desse comportamento em suspensões coloidais são o fracionamento de agregados de partículas e a orientação de partículas assimétricas provocadas pelo aumento da taxa de cisalhamento (figura 2). Muitas tintas apresentam pseudoplasticidade. Em tensões de cisalhamento pequenas o fluido tende a um comportamento newtoniano.

#### 1.b Existência de uma tensão de cisalhamento mínima para iniciar o escoamento.

Os líquidos que apresentam este comportamento são denominados **plásticos**. A taxa de cisalhamento é zero (o líquido não escoam) até que uma tensão de cisalhamento mínima seja aplicada ao sistema (tensão mínima de escoamento,  $\tau_0$ ). Para tensões de cisalhamento maiores que  $\tau_0$ , os fluidos plásticos apresentam um comportamento semelhante aos fluidos pseudoplásticos, ou seja, apresentam uma diminuição da viscosidade aparente com o aumento da tensão de cisalhamento. Quando a tensão mínima de escoamento é muito pequena, torna-se difícil determinar se o sistema é plástico ou pseudoplástico. A plasticidade é devida à existência de um retículo estrutural contínuo na amostra em repouso e que deve ser rompido para que o fluido possa escoar. Massas de modelagem e dispersões de algumas argilas são exemplo de dispersões plásticas.

#### 1.c Aumento da viscosidade aparente com o aumento da tensão de cisalhamento.

Os líquidos que apresentam este comportamento são denominados **dilatantes** por apresentarem um efeito de dilatação. Esses fluidos se comportam como um líquido (escoam) a baixas tensões de cisalhamento, mas podem se tornar tão rígidos (não escoam) quanto um sólido quando submetidos a tensões de cisalhamento elevadas. Esse efeito é observado particularmente em pastas de partículas defloculadas densamente empacotadas. Quando a taxa de cisalhamento é aumentada, esse empacotamento deve ser quebrado para permitir que as partículas se movam umas em relação às outras. A expansão resultante faz com que o líquido seja insuficiente para preencher os vazios criados. À essa expansão se opõe forças de tensão superficial do líquido “aprisionado” entre as partículas. Isso explica porque é fácil empurrar com o pé a areia úmida da praia se fazemos isso lentamente. Mas podemos machucar o pé se chutarmos (aplicarmos uma tensão de cisalhamento elevada) à areia, pois nessa situação ela se comporta como um sólido. Em tensões de cisalhamento pequenas o fluido tende a um comportamento newtoniano.

## 2. Fenômenos dependentes do tempo

### 2.a Tixotropia

A tixotropia é o fenômeno da diminuição da viscosidade aparente com o tempo de cisalhamento, à uma taxa de cisalhamento constante. Como na pseudoplasticidade, a diminuição da viscosidade aparente com o tempo é também devida à quebra de uma estrutura organizada no fluido. Se deixarmos em repouso durante algum tempo um sistema tixotrópico, a viscosidade aparente aumentará devido à formação de uma estrutura mais organizada das partículas em suspensão que “imobiliza” o líquido entre as partículas. Se, a seguir, submetemos o sistema a cisalhamento, a uma velocidade de agitação constante, a viscosidade aparente decrescerá com o tempo até atingirmos o equilíbrio entre quebra e reconstrução da estrutura. A tixotropia é facilmente observada quando mexemos (cisalhamos) com uma espátula uma tinta latex para pintar parede. Inicialmente a tinta parece muito viscosa, mas, com o tempo, ela vai se tornando mais fluida. Soluções de polímeros de massa molar elevada são, em geral, tixotrópicas. Suspensões coloidais de óxido de ferro III, de alumina e algumas argilas, que formam sistemas fracamente gelificados, também apresentam tixotropia.

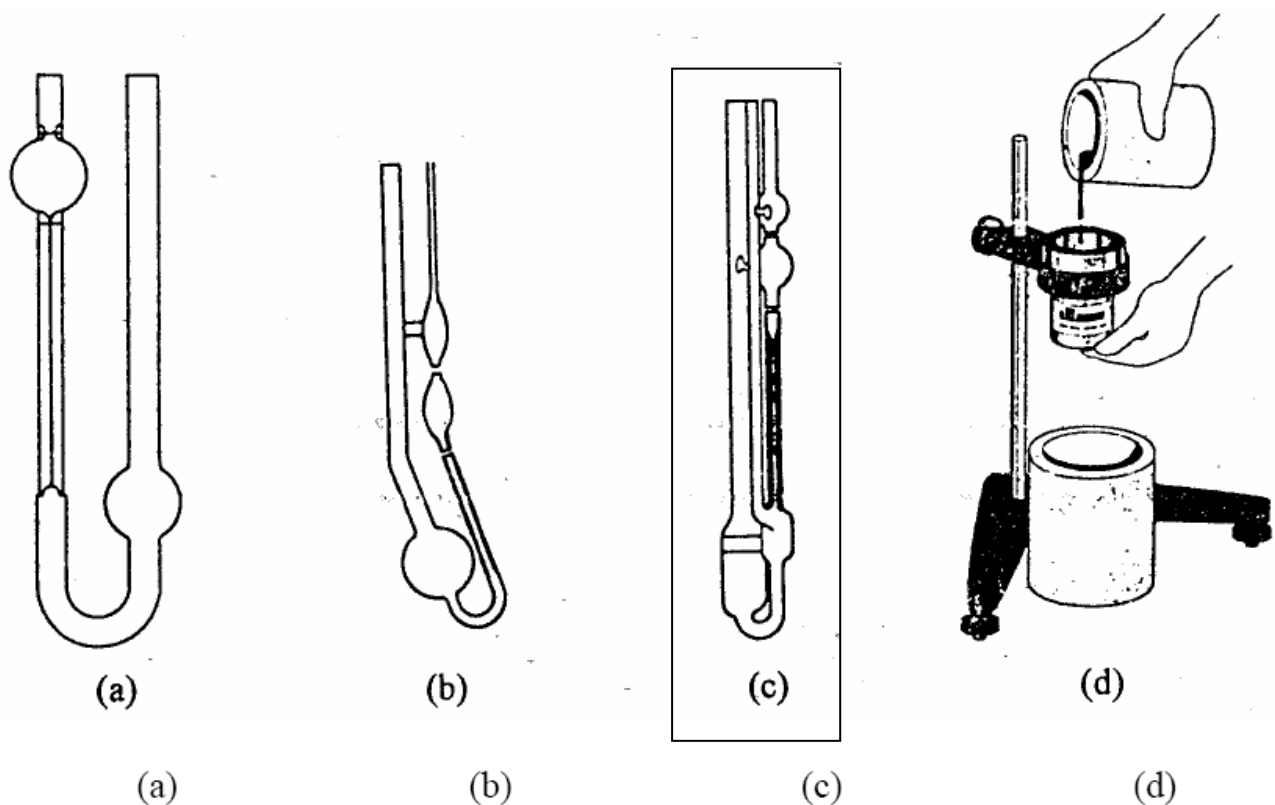
### 2.b Reopexia

A reopexia é o fenômeno do aumento da viscosidade aparente com o tempo de cisalhamento, à uma taxa de cisalhamento constante.

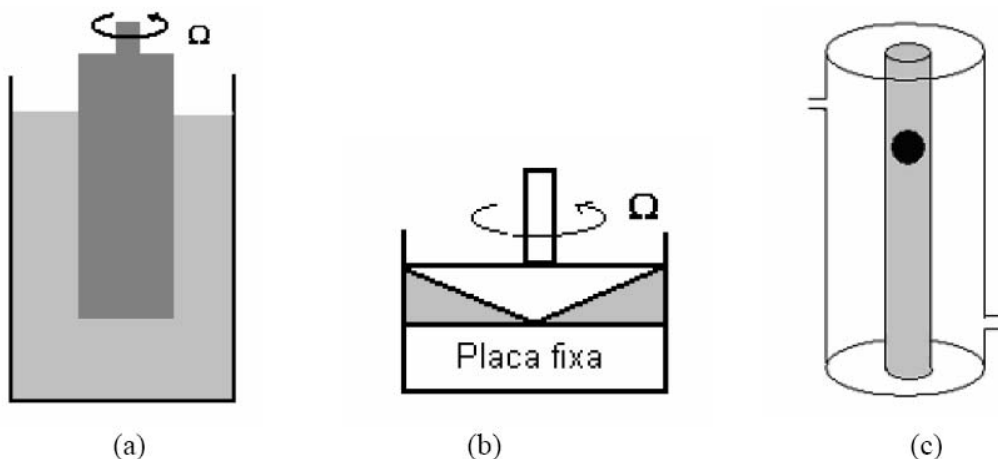
## 3 Viscosímetros e as medidas da viscosidade de substâncias

Existem quatro tipos básicos de viscosímetros:

1. Viscosímetro capilar. A viscosidade é medida pela velocidade de escoamento do líquido através de um capilar de vidro. É medido o tempo de escoamento do líquido entre duas marcas feitas no viscosímetro. A figura 3 apresenta 3 tipos de viscosímetro capilar.
2. Viscosímetro de orifício. A viscosidade é medida pelo tempo que um volume fixo de líquido gasta para escoar através de um orifício existente no fundo de um recipiente.
3. Viscosímetro rotacional. A viscosidade é medida pela velocidade angular de uma parte móvel separada de uma parte fixa pelo líquido. Nos viscosímetros de cilindros concêntricos, a parte fixa é, em geral, a parede do próprio recipiente cilíndrico onde está o líquido. A parte móvel pode ser no formato de palhetas ou um cilindro. Nos viscosímetros de cone-placa, um cone é girado sobre o líquido colocado entre o cone e uma placa fixa (figura 4a e 4b).
4. Viscosímetro de esfera. A viscosidade é medida pela velocidade de queda de uma esfera dentro de um líquido colocado em um tubo vertical de vidro. É medido o tempo que uma esfera gasta para percorrer o espaço entre duas marcas feitas no viscosímetro (figura 4a).



**Figura 3.** Tres tipos de viscosímetro capilar: (a) Ostwald; (b) Cannon-Fenske; (c) Ubbelohde. (d) Viscosímetro de orifício tipo “copo de Ford”.

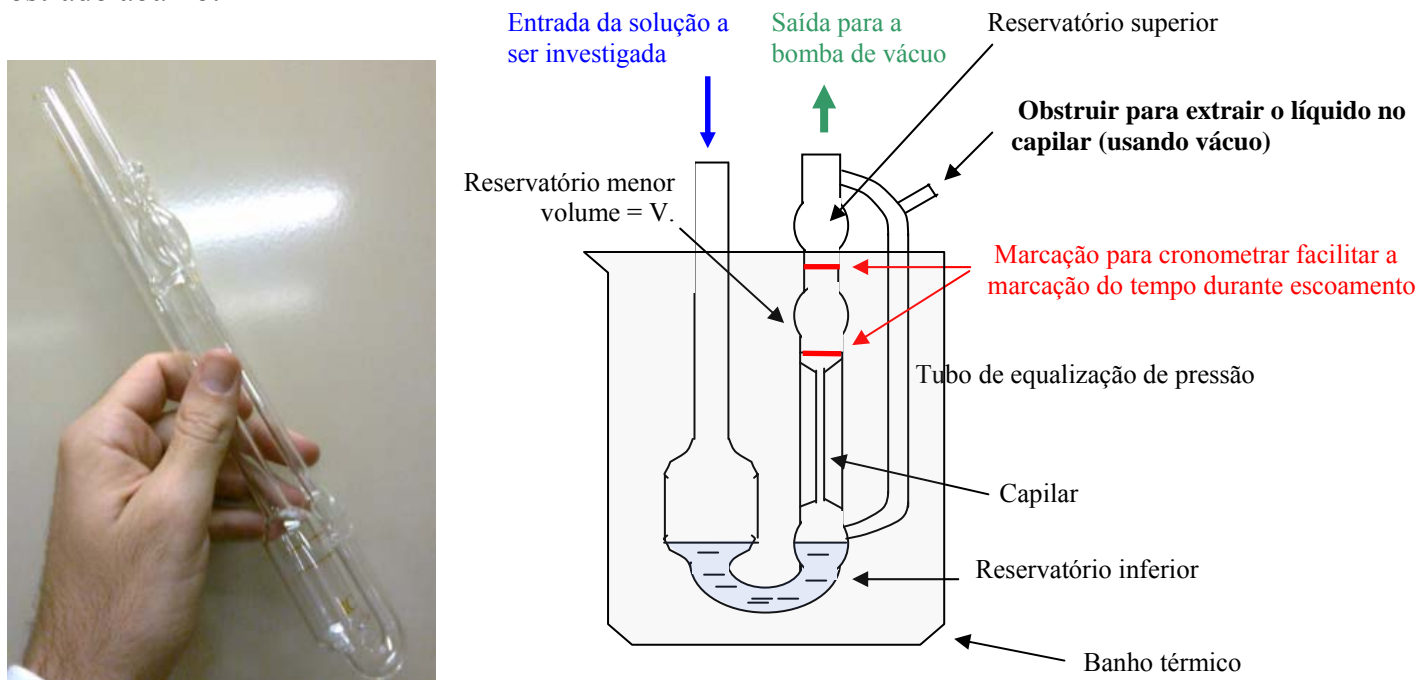


**Figura 4.** Diagrama de viscosímetros: (a) cilindros concêntricos; (b) cone-placa; (c) Viscosímetro de esfera.

A escolha do tipo de viscosímetro a ser utilizado depende do propósito da medida e do tipo de líquido a ser investigado. O viscosímetro capilar não é adequado para líquidos não newtonianos, pois não permite variar a tensão de cisalhamento, mas é bom para líquidos newtonianos de baixa viscosidade. O viscosímetro rotacional é o mais indicado para estudar líquidos não-newtonianos. O viscosímetro de orifício é indicado nas situações onde a rapidez, a simplicidade e robustez do instrumento e a facilidade de operação são mais importantes que a precisão e a exatidão na medida, por exemplo, nas fábricas de tinta, adesivos e óleos lubrificantes.

### 3.1 O viscosímetro de Ubbelohde

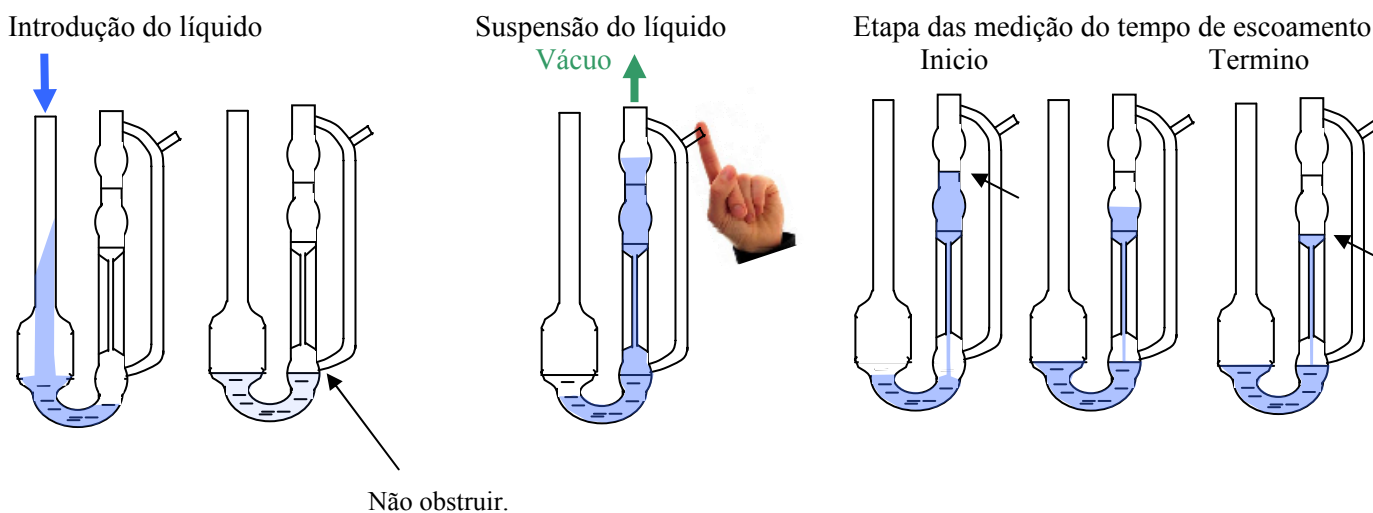
Um dos viscosímetros mais utilizados para determinar a viscosidade intrínseca de soluções é viscosímetro de “nível suspenso” ou viscosímetro de Ubbelohde, cuja diagrama esquemático é mostrado abaixo:



**Figura 5.** – Fotografia e diagrama esquemático do viscosímetro Ubbelohde.

O viscosímetro de Ubbelohde é chamado de nível suspenso ou nível suspenso; porque o líquido extraído inicialmente no bulbo superior pequeno não está conectado ao reservatório enquanto flui abaixo do capilar durante a medida. O capilar é suspenso acima do reservatório. Conjuntamente com o tubo de equalização de pressão, **isto assegura que a única diferença da pressão entre a parte superior do bulbo e a parte inferior do capilar seja aquela devido à pressão hidrostática**, isto é, o devido ao próprio peso do líquido.

Um diagrama esquemático do funcionamento do viscosímetro antes e durante sua operação pode ser visto na figura abaixo



**Figura 6.** – Diagrama esquemático do funcionamento do viscosímetro Ubbelohde.



O funcionamento de um viscosímetro do tipo capilar é conceitualmente simples: Compara-se o tempo gasto por uma solução (polimérica) escorrer por um fino capilar com o tempo gasto por uma solução padrão (ex. água destilada). Segundo a teoria, o tempo de escoamento é proporcional a viscosidade do fluido e inversamente proporcional à sua densidade:

$$t_{solv} = \frac{\eta_{solv}}{\rho_{solv}} \quad \text{e} \quad t_{solucao} = \frac{\eta_{solucao}}{\rho_{solucao}} \quad (4)$$

Definimos a grandeza adimensional **viscosidade relativa** ( $\eta_{rel}$ ) como sendo a razão entre a viscosidade da solução ( $\eta_{solucao}$ ) e a viscosidade do solvente puro ( $\eta_{solv}$ ):

$$\eta_{rel} = \frac{\eta_{solucao}}{\eta_{solv}} \quad (5)$$

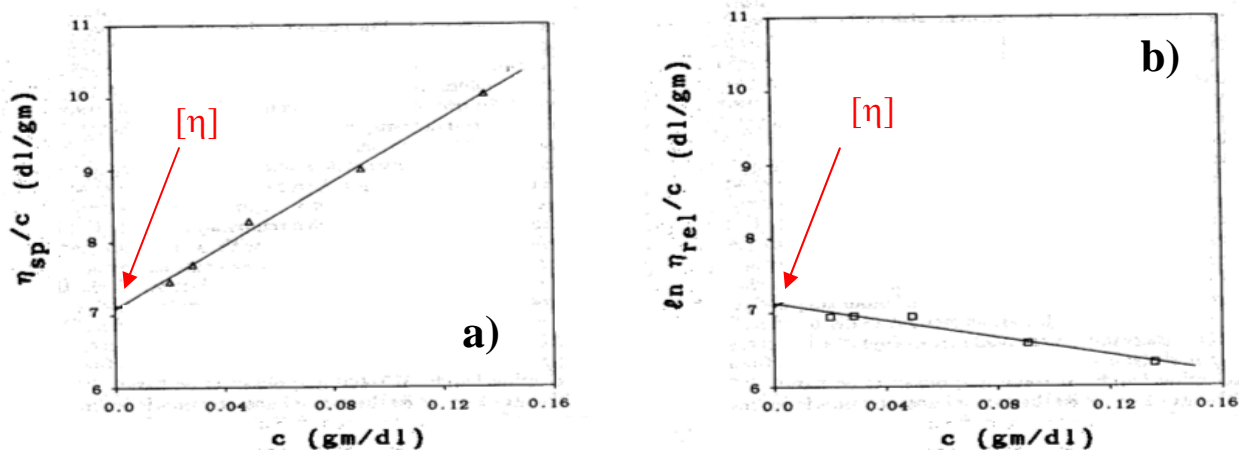
Para muitas soluções poliméricas nas concentrações de interesse temos (soluções diluídas) temos  $\rho_{solucao} / \rho_{solv} \approx 1$ . Portanto, a viscosidade relativa depende simplesmente da razão dos tempos:

$$\eta_{rel} \approx \frac{t_{solucao}}{t_{solv}} \quad (6)$$

Podemos ainda definir **viscosidade específica** ( $\eta_{sp}$ ), outra grandeza adimensional, como sendo:

$$\eta_{sp} \approx \frac{\eta_{solucao} - \eta_{solv}}{\eta_{solv}} \quad (7)$$

Ambos  $\eta_{rel}$  e  $\eta_{sp}$  dependem da concentração da substancia na solução, portanto para extrair as propriedades intrínsecas da substancia é necessário extrapolar essas medidas para concentração “zero” ( $c=0$ ). As duas quantidades, que são comumente plotadas em função da concentração e extrapoladas para  $c=0$  são  $\eta_{sp}/c$  e  $\ln(\eta_{rel})/c$ . Nas figuras abaixo podemos ver dois gráficos de um experimento típicos de determinação de viscosidade mostrando  $\eta_{sp}/c$  versus  $c$  e também  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$ .



**Figura 7** - Gráficos típicos de experimentos para a determinação de viscosidade mostrando. a)  $\eta_{sp}/c$  versus  $c$ . b)  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$ . O coeficiente linear em ambos os caso dá reta é a viscosidade intrínseca da substancia estudada.

Como pode ser percebido acima, após um ajuste linear aos pontos experimentais, ambas as retas tocam o eixo vertical no mesmo ponto quando a concentração é extrapolada para zero ( $c=0$ ) esse

Fís.-Qui. Exp. 1 – Prática 4: Determinação da Viscosidade de líquidos 8



ponto é chamado de **viscosidade intrínseca**  $[\eta]$  do composto estudado. A viscosidade intrínseca pode ser definida formalmente como:

$$[\eta] = \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\eta_{sp}}{c} \equiv \lim_{c \rightarrow 0} \frac{\ln \eta_{rel}}{c} \quad (8)$$

Vimos que a viscosidade relativa pode ser obtida sem conhecermos de fato a viscosidade da solução (em diferentes concentrações) ou a do solvente puro, mas apenas conhecendo o tempo de escoamento de ambos em uma mesma temperatura (Eq. 6). Portanto, a partir do coeficiente linear de um gráfico  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$  (Fig. 7b) podemos determinar a viscosidade intrínseca  $[\eta]$  da substância estudada.

#### 4) Procedimento experimental

##### EXPERIMENTO 1 – Determinação da constante do viscosímetro.

###### Dicas importantes:

- Deixe o sistema entrar em equilíbrio térmico antes de realizar cada medida.
- Limpe bem o viscosímetro com água destilada após cada solução.
- Meça o escoamento das soluções menos concentradas antes das mais concentradas.
- Utilizar aproximadamente o mesmo volume de solução nas experiências.
- Antes de realizar a medida propriamente dita, suspenda o fluido umas 2 ou 3 vezes para que o capilar e os dois reservatórios acima do capilar fiquem com a temperatura desejada.

A) Complete a tabela abaixo com o tempo de escoamento para água pura (duas medidas) no viscosímetro adotado.

Temperatura, T (°C)	Densidade, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidade, $\eta$ (10 <sup>-3</sup> N. s/m <sup>2</sup> )	Tempo escoamento, t (seg)			$\rho \times t$ (Kg s /m <sup>3</sup> )
			med. 1	med. 2	Média	
~0	999.9	1.787				
10	999.7	1.307				
20	998.2	1.002				
30	995.7	0.798				
40	992.2	0.653				
50	988.1	0.547				
60	983.2	0.467				
70	977.8	0.404				
80	971.8	0.355				
90	965.3	0.315				
~100	958.4	0.282				

Obs.  $1 \text{ N s/m}^2 = 1 \text{ Pa s} = 10 \text{ poise} = 1000 \text{ mPa s}$

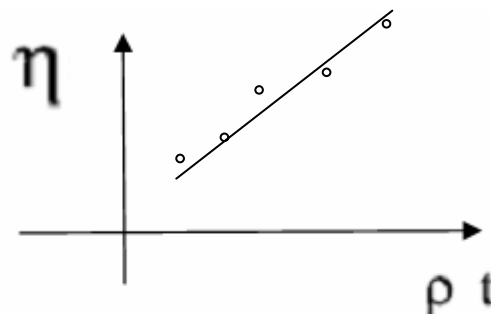
Fonte: Dortmund Data Bank. [http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d\\_596.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-dynamic-kinematic-viscosity-d_596.html)  
[http://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d\\_595.html](http://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html)

B) Sabendo que em viscosímetro capilar, a viscosidade do líquido é proporcional a sua densidade (que varia com a temperatura) e tempo de escoamento:

$$\eta = k \rho t$$

onde  $k$  é uma constante do viscosímetro,  
 $\rho$  a densidade do líquido  
 $t$  o tempo de escoamento.

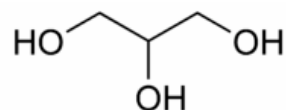
Faca um gráfico da  $\eta$  versus  $\rho t$  utilizando os pontos obtidos para a água em diferentes temperaturas e determine, a partir de um ajuste linear, a constante do viscosímetro,  $k$ . Qual é a unidade da constante do viscosímetro no sistema internacional?



$k =$

## EXPERIMENTO 2 – Determinação do tempo de escoamento de soluções em função da concentração e determinação da viscosidade intrínseca.

### PARTE 1 – SOLUÇÕES DE GLICEROL ( $C_3H_8O_3$ )



Obs: Outros nomes do glicerol são propano-1,2,3-triol e glicerina.

1) Utilizando o mesmo viscosímetro do item anterior meça o tempo de escoamento das soluções abaixo em 3 diferentes temperaturas.

**Dica:** Para facilitar a preparação das soluções faça as misturas utilizando proporções em volume. Para os cálculos da molaridade e da concentração comum utilize os valores médios de densidade da água, glicerol de  $1,0 \text{ g/cm}^3$ ,  $1,26 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. A massa molar do glicerol é  $92,07 \text{ g}$ .

Item A - água (95% vol) + glicerol (5% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	média
20					
40					
60					

Item B - água (90% vol) + glicerol (10% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	média
20					
40					
60					

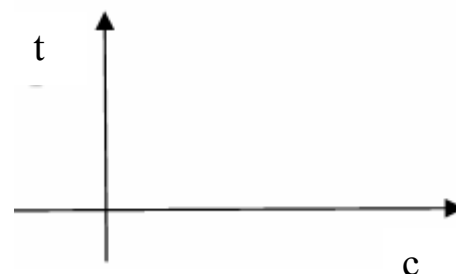
Item C - água (80% vol) + Glicerol (20% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	média
20					
40					
60					

Item D - água (70% vol) + Glicerol (30% vol)

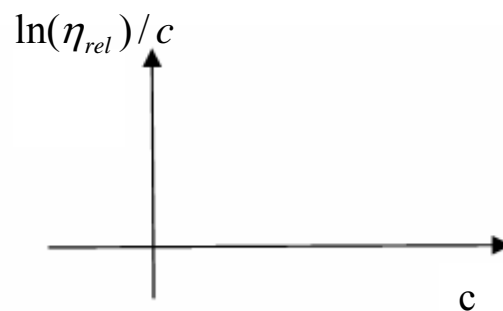
Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	média
20					
40					
60					

2 – Faça um gráfico mostrando como varia o tempo de escoamento das soluções de glicerol (ITENS A,B,C,D) em função da concentração em cada uma das 3 temperaturas acima (20°, 40° e 60° C).



3- Calcule a viscosidade relativa para as soluções de glicerol na temperatura de 20° C e 40° C.

4) Construa os gráficos  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$  para as soluções de glicerol a 20° C e 40° C. **Sugestão:** Adote a unidade da concentração como g/mL.

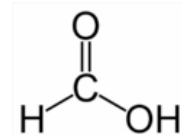


5) Determine a viscosidade intrínseca  $[\eta]$  do glicerol fazendo um ajuste linear no gráfico  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$ . Compare os resultados nas diferentes temperaturas. Lembre-se que  $[\eta]$  é adimensional. **DICA: O ajuste linear só deve ser feito nos pontos obtidos em baixas concentrações.**

6- Conhecendo a constante do viscosímetro (EXPERIMENTO 1) e sabendo que a densidade do glicerol a 40°C é 1.261 g/cm<sup>3</sup>, calcule sua viscosidade nessa temperatura.

7- Comente as dificuldades encontradas para realizar os experimentos e cite as principais fontes de erros do procedimento experimental.

## PARTE 2 (OPCIONAL) – SOLUÇÕES DE ÁCIDO FÓRMICO (HCOOH)



Obs: Outros nomes do ácido fórmico são ácido metanóico e ácido formilico.

**ATENÇÃO: Por motivos de segurança realizar os experimentos desta parte dentro da capela com exaustão ligada! A temperatura do sistema NÃO deve ser maior do que 55° C.**

**Dica:** Para facilitar a preparação das soluções faça as misturas utilizando proporções em volume. Para os cálculos da molaridade de concentração utilize os valores médios de densidade da água e ácido fórmico de 1,0 g/cm<sup>3</sup> e 1,22 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A massa molar do ácido fórmico é 46,02 g.

1) Utilizando o mesmo viscosímetro do item anterior meça o tempo de escoamento das soluções abaixo em 3 diferentes temperaturas.

Item A - água (95% vol) + HCOOH (5% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	Média
20					
40					
50					

Item B - água (90% vol) + HCOOH (10% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	Média
20					
40					
50					

Item C - água (80% vol) + HCOOH (20% vol)

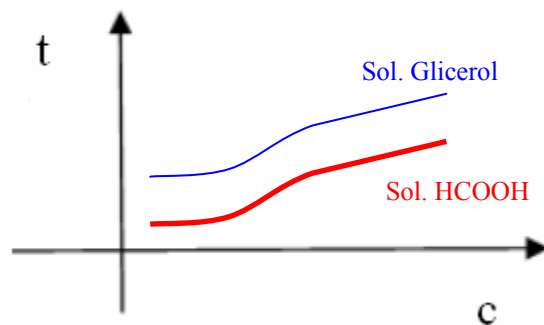
Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	Média
20					
40					
50					

Item D - água (70% vol) + HCOOH (30% vol)

Temperatura (°C)	Molaridade (mol/L)	Concentração (g/L)	Tempo escoamento, t (seg)		
			med. 1	med. 2	Média
20					
40					
50					

2 – Faça um gráfico mostrando como varia o tempo de escoamento da solução de ácido fórmico em função da concentração em cada uma das 3 temperaturas acima (20°, 40° e 50° C).

3 – Para fins de comparação, faça um gráfico mostrando **ao mesmo tempo** como varia o tempo de escoamento da solução glicerol e de ácido fórmico em função da concentração na temperatura de 40°. Use cores diferentes para os dados do glicerol e ácido fórmico.



4- Calcule a viscosidade relativa para as soluções ácido fórmico na temperatura de 20° C e 40°C.

5) Construa os gráficos  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$  para as soluções de ácido fórmico a 20° C e 40° C. **Sugestão:** Adote a unidade da concentração como g/mL.

6) Determine a viscosidade intrínseca  $[\eta]$  do ácido fórmico fazendo um ajuste linear no gráfico  $\ln(\eta_{rel})/c$  versus  $c$ . Compare os resultados nas diferentes temperaturas. Lembre-se que  $[\eta]$  é adimensional. **DICA: O ajuste linear só deve ser feito nos pontos obtidos em baixas concentrações.**

7- Conhecendo a constante do viscosímetro (EXPERIMENTO 1) e sabendo que a densidade do HCOOH a 40°C é 1.22 g/ cm<sup>3</sup>, calcule sua viscosidade nessa temperatura. Compare esse resultado com o resultado obtido para o glicerol (PARTE 1, Item 6).

8- Comente as dificuldades encontradas para realizar estes experimentos e cite as principais fontes de erros do procedimento experimental.

## 5. Bibliografia e literatura adicional.

1. Shaw, D. S.; Introdução à química dos colóides e de superfícies. Tradução: Juergen Heinrich Maar. Edgard Blucher, Editora da Universidade de São Paulo, 1975. Capítulo 9.
2. Rodrigez, F.; Principles of polymer systems; McGraw-Hill; segunda edição. Capítulo 7.
3. Fazenda, J. M.; Tintas e vernizes: ciência e tecnologia. Editado pela ABRAFAT (Associação Brasileira dos Fabricantes de Tintas). São Paulo. 1993. Volume 2.
4. Vieira, R. C. C.; Atlas de mecânica dos fluidos e fluidodinâmica. Editora Edgard Blucher. 1971.
5. Kirk-Otmer; Encyclopedia of chemical technology. John Wiley & Sons. Volume 20; p.259.
6. Van Holde, K. E.; Bioquímica Física; Tradução de Juergen Heinrich Maar. Edgard Blucher. 1975.
7. J. Brandrup e H.Immergut, editores. Polymer Handbook. JohnWiley & Sons, New York, 1975.
8. F. Daniels. Experimental Physical Chemistry. McGraw-Hill Book Co., 6ª edição. 1962, p.296-300.
9. D.P.Shoemaker e C.W.Garland.Experiments in Physical Chemistry. McGraw-Hill Kagakusha, 2ª edição, 1967, p. 278-286 .
10. Roteiro experimental sobre viscosidade de líquidos do curso de Físico-química experimental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).
11. Roteiro experimental sobre viscosidade de líquidos do curso de Físico-química experimental da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
12. Detalhes sobre o viscosímetro Ubbelohde:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Ubbelohde\\_viscometer](http://en.wikipedia.org/wiki/Ubbelohde_viscometer)
13. Viscosidade intrínseca com Ubbelohde:  
<http://macro.lsu.edu/howto/IntrinsicVisc.doc>
14. Animação de viscosímetro capilar operando:  
[http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise\\_instrumental/aula4e.html](http://chasqueweb.ufrgs.br/~ruth.santana/analise_instrumental/aula4e.html)
15. Detalhes sobre Equação de Mark-Houwink:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Mark-Houwink\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Mark-Houwink_equation)
16. Tabela de viscosidade da glicerina  
<http://www.dow.com/glycerine/resources/table18.htm>  
<http://bit.ly/921EI6>