

Laboratório de Física para Licenciatura em Geociências

FMT0112

3º Experimento

Determinação do coeficiente de viscosidade de líquidos

Equipe de Professores/Técnico

Renato F. Jardim, rjardim@if.usp.br

Maria Isabel Veras, mbebelveras@yahoo.com.br

Edelberto José dos Santos, ejsantos@if.usp.br

Instituto de Física, Universidade de São Paulo
São Paulo, 2009

Renato F. Jardim©2009

Introdução

A muito bem conhecida segunda lei de Newton, que estabelece: “força é proporcional à aceleração”, parece as vezes contradizer muitas das experiências do nosso cotidiano. Observe, por exemplo, o movimento de corpos sob a influência de atrito ou fricção. Nessas situações uma descrição do tipo “força é proporcional à velocidade” descreveria bem melhor, por exemplo, o deslocamento de uma bicicleta a velocidade constante. Se alguém quiser deslocar a bicicleta com maior velocidade e de forma progressiva, deveria cada vez mais produzir esforço pedalando. Sendo assim, nos muitos processos (via de regra mecânicos) em que o atrito ou fricção são importantes o estabelecimento do postulado “força é proporcional à velocidade” é verdadeiro. Esse tipo de postulado vem sendo aplicado com sucesso na descrição e entendimento de diversos fenômenos onde o atrito ou a fricção ocorrem como na queda de objetos em fluidos e gases e em diversas outras situações.

Vamos considerar que esteja muito quente e você junto com uma turma de colegas estejam sentados na mesa de uma lanchonete tomando líquidos com canudinhos para minimizar o calor. Alguns estão tomando refrigerante, outros vitaminas de frutas, um tomando mel (tem gosto para tudo !) e um outro tomando óleo de fígado de bacalhau. Se você prestar bem atenção às forças que seus colegas exercem para sugar o canudinho perceberá que elas são muito diferentes. Por exemplo, o esforço feito pelos colegas que tomam refrigerantes nem se compara com àquele feito pelo que toma o mel (se é que ele consegue tomar mel com canudinho !). Esse tipo de observação talvez não seja a mais indicada para ser feita em um encontro entre amigos mas pode ser muito útil para o entendimento do experimento de hoje. É possível resumi-la assim: líquidos diferentes adquirem velocidades diferentes quando escoam por um mesmo tudo.

A diferença entre os esforços feitos pelos diferentes colegas está relacionada a uma grandeza muito importante de fluidos e que é chamada de *viscosidade ou coeficiente de viscosidade*. Na verdade, a diferença de esforços feitos indica que fluidos diferentes devem apresentar resistências diferentes ao movimento relativo de suas moléculas quando submetidos a uma diferença de pressão, que é o caso de alguém quando aspira um líquido pelo canudinho. Sendo assim, a grandeza física que relaciona as forças de resistência ao movimento de um fluido é denominada de *viscosidade*, e o estudo do escoamento ou deformação dos fluidos, sob efeito da pressão, é denominado de *reologia*.

Uma maneira relativamente simples de compreender o significado de viscosidade é visualizar o movimento relativo de moléculas em um dado fluido (gases, vapores, líquidos, materiais plásticos, ou mesmo grãos de

matéria sólida). É necessário que as moléculas em movimento “se esfreguem” uma nas outras, ou seja, existe uma força de cisalhamento entre elas. O resultado líquido desse processo de fricção é uma força de atrito entre essas moléculas e, portanto, o aparecimento da *viscosidade*. Essa força de atrito é comumente chamada de força viscosa. A *viscosidade* é então uma grandeza física muito utilizada como parte da caracterização de um fluido. No caso de substâncias ou materiais de constituição molecular relativamente simples, e em aplicações típicas, a *viscosidade* é uma propriedade do fluido que depende bastante da temperatura, mas não depende da velocidade de escoamento, por exemplo. Por outro lado, para fluidos constituídos de moléculas mais complexas, como os polímeros, a viscosidade pode ser função de outros parâmetros, além da temperatura, como a pressão e a velocidade de escoamento. Entretanto, independente de sua constituição, os diferentes materiais fluidos são caracterizados, com frequência, tanto em ambientes científicos como tecnológicos, por sua viscosidade.

Fluido em Movimento

Os fluidos ditos simples são também denominados de *fluidos Newtonianos*. Para que esse conceito seja ampliado, imagine um fluido escoando (em movimento) num tubo cilíndrico. Assuma também que o fluido seja constituído *camadas* (podem ser pequenos paralelepípedos finos). Em cada camada a velocidade v é constante, mas varia de camada para camada, como mostra a figura abaixo. Note que há um deslocamento (escoamento) horizontal destas camadas, dado pela velocidade v , mas também existe a “esfregação ou fricção ou atrito” entre as camadas adjacentes do fluido. Essa fricção é chamada de tensão de cisalhamento T_C . No limite de camadas muito finas (como uma folha de papel), ou seja, de Δr sendo muito pequeno, a tensão (ou força) de cisalhamento em um fluido *Newtoniano* é dada por

$$T_C = \eta (\Delta v / \Delta r) \quad (1)$$

onde $\Delta v / \Delta r$ corresponde ao o gradiente da velocidade do fluido em relação a r , ou seja, a razão da variação da velocidade Δv quando se varia de uma camada do fluido posicionada a uma distancia r do centro do tubo cilíndrico para uma outra camada a uma distancia $r + \Delta r$, pela variação da distancia do centro do tubo Δr . A *viscosidade* do fluido em questão é representada pela letra grega η , e T_C é a tensão de cisalhamento. Essa tensão é dada pela força aplicada tangencialmente a superfície do fluido (no limite entre duas camadas) por unidade de área. Uma análise dimensional

da Equação 1 indica que a viscosidade η tem unidades no sistema internacional de Newton.Segundo/metro², ou kg/(metro.segundo). Esta última unidade (kg/(m.s)) pode ser também ser escrita como Pa s (Pascal.segundo). No sistema CGS a unidade de viscosidade dinâmica é conhecida como poise P ($P = \text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$). Sendo assim, $1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}) = 10 \text{ P}$. A unidade Poise identifica a chamada viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica e, em geral, é expressa com o prefixo centi, ou seja, um centipoise (cP) é um milipascal segundo (mPa.s) em unidades SI. Por outro lado, na dinâmica de fluidos, utiliza-se também a chamada viscosidade cinemática que é definida como $\eta_c = \eta/\rho_L$, onde η é a viscosidade absoluta e ρ_L é a densidade do fluido (dada em kg/m³). A unidade da viscosidade cinemática η_c , no SI, é m²/s é comumente chamada de Stokes. A **viscosidade** de um líquido depende muito da temperatura, ou seja, ela decresce significativamente com o acréscimo da temperatura. Tipicamente, a água, a temperatura de 20 °C, apresenta valor de viscosidade de $\sim 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$, a glicerina pura, na mesma temperatura, tem viscosidade de 1,41 Pa.s, valor este que decresce apreciavelmente para 0,612 Pa.s ao redor de 30 °C.

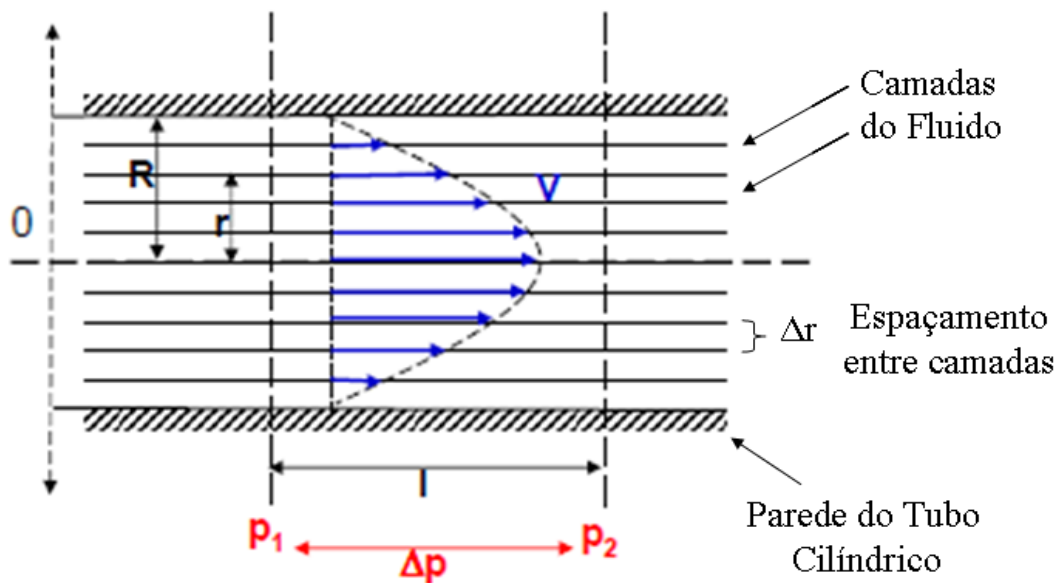


Figura 1 – Desenho esquemático de um fluido deslocando-se dentro de um tubo cilíndrico de raio R .

O número de Reynolds, tipos de escoamento e o regime de Poiseville

O número de Reynolds Re é muito utilizado para classificar o tipo de escoamento ou fluxo de um dado fluido. Antes então de descrevermos os tipos de escoamento ou fluxo, é melhor definir o que é o número de Reynolds. Como dito, ele é um número, portanto não tem dimensão, e é dado pela razão de duas forças que competem entre si durante o movimento de um dado fluido: a força inercial, que depende da velocidade e faz com que o fluido escoe, e a força viscosa, que tende exatamente a frear esse movimento. Ele é dado então por

$$Re = (\rho_L v d / \eta) \quad (2)$$

onde ρ_L é a densidade do fluido, v a sua velocidade, d é um comprimento característico do escoamento (aqui $d = 2R$, o diâmetro do tubo por onde o fluido escoia (ver Figura 1)) e η a viscosidade do fluido. No caso do experimento de Stokes, discutido abaixo, o comprimento característico d é essencialmente o diâmetro da esfera e v a sua velocidade terminal.

Como mencionado, o número de Reynolds fornece um bom parâmetro para classificar o tipo de escoamento ou fluxo de um fluido. O regime de escoamento de um fluido é muito importante no design e operação de qualquer sistema fluido. A quantidade de fricção ou atrito, que na verdade determina a quantidade de energia necessária para manter um dado escoamento, depende necessariamente do tipo escoamento. Obviamente que o regime de escoamento é um parâmetro relevante também no que concerne as aplicações tecnológicas, principalmente quando transferência de calor é envolvida.

De maneira geral, o escoamento ou fluxo de um fluido pode ser classificado em três categorias: (1) fluxo estacionário ou lento (“creeping flow”), onde o número de Reynolds é muito pequeno ($Re \lesssim 1$) e os efeitos referentes a forças inerciais são essencialmente desprezíveis; (2) fluxo laminar ou lamelar, onde o escoamento varia de forma suave e o número de Reynolds assume valores baixos e intermediários ($1 \lesssim Re \lesssim 2500$). No fluxo laminar, as camadas de água, por exemplo, movem-se uma sobre as outras com velocidades diferentes mas sem haver mistura entre as camadas. Se ao invés de camadas o caso for de uma partícula de fluido, ela move-se nesse regime através de caminhos muito bem definidos e esperados. Ainda, o regime de fluxo laminar é característico de fluidos viscosos ou naqueles em que a viscosidade é parcela importante das forças presentes; e (3) o chamado regime turbulento, onde Re é muito alto ($Re \gtrsim 2500$) e o

escoamento é caracterizado pelo movimento irregular das partículas do fluido. Aqui não há frequências bem definidas no movimento, como existe no movimento de ondas. A trajetória experimentada por uma partícula do fluido é essencialmente irregular e as camadas de fluido definidas acima, são inexistentes.

Exemplos de fluxo estacionário ou lento incluem o movimento de pequenos objetos em um fluido, como é o caso da sedimentação de partículas de poeira (ou pequenas folhas em lagos) e o movimento de pequenos microorganismos em meio aquosos. Outros exemplos envolvem o escoamento de fluidos através de pequenos orifícios, como a formação de rochas. O escoamento de fluidos com alta viscosidade pode ser descrito pelo fluxo estacionário como é o caso do transporte de óleos pesados ou mesmo alguns processamentos de alimentos. Exemplos visuais dos dois regimes de fluxo de fluidos mais importantes (laminar e turbulento) são mostrados na Figura 2.

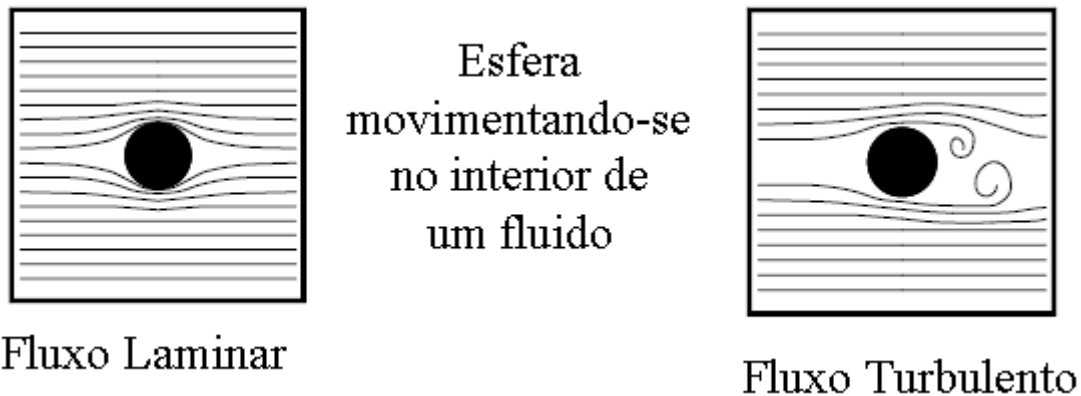


Figura 2 – Desenho esquemático de uma esfera movimentando-se sob os regimes de fluxo laminar ou lamelar (esquerda) e turbulento (direita).

Acerca do regime de escoamento turbulento, é possível dizer que ele compreende então um tipo de fluxo no qual o fluido atravessa flutuações muito irregulares, se mistura e se difere bastante do fluxo laminar, no qual o fluido move-se de forma suave através de trajetórias bem comportadas ou em camadas bem definidas. No regime turbulento, a velocidade do fluido em um dado ponto qualquer é alterada de forma contínua através do tempo (tanto na direção como na magnitude), constituindo o fenômeno da turbulência. A turbulência provoca um maior atrito entre os componentes com elevada perda de energia, o que aumenta a resistência por viscosidade. Os fluxos de ventos e rios podem ser considerados como turbulentos, mesmo assumindo que as variações de corrente sejam moderadas. Adicionalmente, a maioria dos fluxos de fluidos pode ser classificada como pertencente ao regime de fluxo turbulento, exceto naturalmente aqueles

lamelares clássicos como fluidos próximos a uma superfície sólida (é o caso ilustrado na Figura 1 (fluido dentro de um duto)) ou em casos de fluidos de alta viscosidade que escoam de forma muito lenta dentro de canais ou dutos. Por outro lado, são exemplos canônicos de fluxo turbulento: o fluxo de sangue através das artérias, o transporte de óleo em dutos, o fluxo de lavas de vulcão, as correntes oceânicas e atmosféricas, o fluxo do ar ao redor das asas de um avião entre outros. A turbulência provoca maior atrito com elevada perda de energia, o que aumenta a resistência por viscosidade.

Retornando ao número de Reynolds, que é a razão entre as forças de inércia e viscosa de um fluido, ele é provavelmente o parâmetro mais importante em estudos envolvendo a dinâmica de fluidos. No sentido de averiguar se o escoamento ou fluxo de um dado gás, água ou qualquer outro fluido é laminar ou turbulento, o cálculo de Re é sempre necessário. No caso em que as forças de inércia são robustas, $Re \geq 2500$, e o escoamento é esperado ser turbulento. Se, por outro lado, as forças viscosas são mais ou menos comparáveis com as de inércia $Re \lesssim 2500$ e o escoamento ou fluxo é caracterizado como laminar. Diversos experimentos indicam que estes valores de Re independem da densidade e da viscosidade do fluido, daí a grande importância do número de Reynolds.

O regime de Poiseville e a determinação da viscosidade relativa

Dadas as condições descritas acima, vamos nos concentrar no regime de escoamento de fluidos denominado de *laminar*, *lamelar* ou escoamento no regime de *Poiseville*. A partir disso, é nosso objetivo aqui encontrar uma relação entre grandezas para a determinação da viscosidade de fluidos. Como ilustra a Fig.1, nesse regime *laminar*, a velocidade de escoamento do fluido é máxima no centro do duto e decresce de forma monotônica e quase parabolicamente em direção às paredes do tubo, onde exibe velocidade nula. Nestas condições, vamos definir o que é vazão Q de um fluido com viscosidade η ao longo de um tubo de raio R : é a quantidade de fluido que passa por uma secção transversal A do tubo por unidade de tempo, ou seja,

$$Q = (A R^2 / 8 \eta) \cdot (\Delta P / \Delta l) \quad (3)$$

onde $A = \pi R^2$ é a área da secção transversal do tubo cilíndrico, e a razão $\Delta P / \Delta l$ é o gradiente de pressão (entre P_1 e P_2) ao longo de uma distância l (Δl) ou do tubo. Desta forma, o volume ΔV de fluido que atravessa a

secção do tubo, em um intervalo de tempo Δt , é dado por $\Delta V = Q \Delta t$, e utilizando-se da Equação 3, pode-se obter

$$\Delta V = (\pi R^4 / 8 \eta) \cdot (\Delta P / \Delta l) \cdot \Delta t \quad . \quad (4)$$

A relação descrita acima é suficiente para que a determinação da viscosidade η de um dado fluido possa ser feita. Para isso feito, seria necessário conhecer alguns parâmetros de interesse como aqueles geométricos do tubo como o seu raio R e o comprimento Δl . Seria necessário também conhecer a vazão Q e a diferença de pressão ΔP (entre P_1 e P_2).

A determinação precisa dos parâmetros contidos na Equação 4 não é uma tarefa fácil. Em primeiro lugar, a determinação de ΔP , apesar de possível, requer cuidados e equipamentos relativamente sofisticados. Outro agravante concerne às medidas de vazão, que são difíceis de serem efetuadas e, via de regra, consomem muito da substância a ser investigada. Por esses e outros motivos, o objetivo aqui é procurar uma alternativa para a determinação da viscosidade de um fluido utilizando o procedimento descrito acima. O próximo tópico aborda esse ponto.

Viscosidade relativa de fluidos e o viscosímetro de Ostwald

Vamos então considerar agora uma situação similar à mostrada na Figura 1, só que rotacionada de 90° . Tal situação é esquematizada na Figura 3. Nessa configuração, um dado fluido de densidade ρ_L será deslocado verticalmente através do capilar devido a força da gravidade. Isso implica que a variação de pressão ΔP depende apenas da altura h entre os níveis superior e inferior do fluido no bulbo superior. Este é o famoso teorema de Stevin, também conhecido como princípio fundamental da hidrostática. Sendo assim, $\Delta P = \rho_L g h$ onde g é a aceleração da gravidade.

Retornando à Equação 4, é possível substituir ΔP de maneira a obter parâmetros do líquido em estudo. Se este for um fluido arbitrário, sua densidade pode ser descrita apenas por ρ , ou seja

$$(\rho / \eta) \cdot \Delta t = (\Delta V / h) \cdot (g \pi R^4 / 8 \Delta l)^{-1} \quad . \quad (5)$$

É importante salientar que a Equação 5 é válida para qualquer fluido e esse é um ponto de interesse. Ao garantir que dois fluidos distintos sejam escoados pelo mesmo tubo, ou seja, que as mesmas condições experimentais sejam aplicadas a dois fluidos diferentes, a Equação 5

apresentará como valores fixos ΔV , h , R e Δl . Sendo assim, a Equação 5 poderá ser reescrita como

$$(\rho/\eta).\Delta t = k , \quad (6)$$

onde k é uma constante que depende essencialmente do aparato usado para desenvolver as expressões e *não do fluido em estudo*.

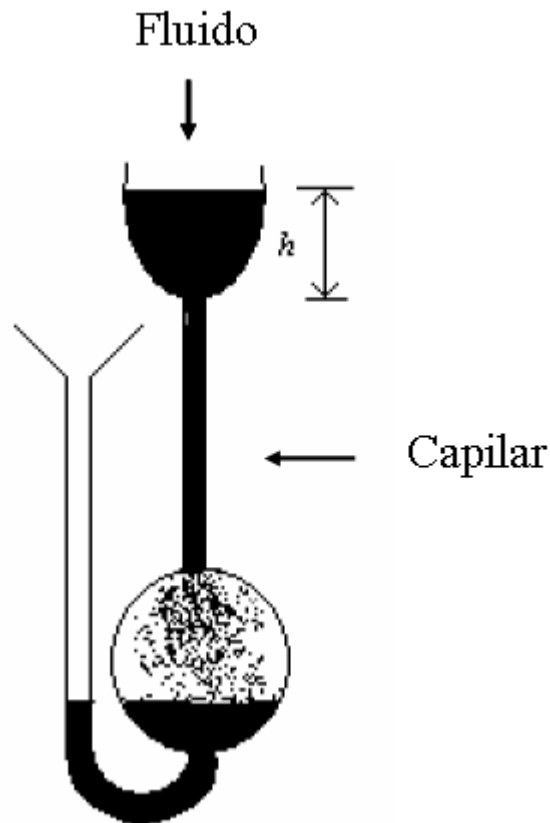


Figura 3 – Tubo ou viscosímetro vertical. O fluido escoam através do capilar até atingir o bulbo na parte inferior do viscosímetro.

Vamos então retornar ao início do texto e lembrar que líquidos diferentes adquirem velocidades diferentes quando escoam por um mesmo tubo. Essa frase, associada ao resultado obtido na Equação 6, nos convida a extrair a viscosidade relativa de fluidos via medidas relativamente simples, ou seja, de tempos de escoamento. Para isso, vamos supor dois fluidos diferentes, denominados arbitrariamente de 1 e 2, e que serão acondicionados igualmente em um aparato similar ao mostrado na Figura 3. Se isso for feito, a Equação 6 aplicada a esses dois fluidos pode ser reescrita como

$$(\rho_1/\eta_1).\Delta t_1 = k \quad \text{e} \quad (\rho_2/\eta_2).\Delta t_2 = k \quad (7)$$

onde os índices 1 e 2 denotam os fluidos diferentes 1 e 2. As duas Equações em (7) podem ser igualadas, o que resulta em

$$(\rho_1/\eta_1).\Delta t_1 = (\rho_2/\eta_2).\Delta t_2 \quad (8)$$

ou ainda

$$(\eta_2/\eta_1) = (\rho_2/\rho_1) (\Delta t_2 / \Delta t_1) \quad . \quad (9)$$

A razão das viscosidades dos dois fluidos é então descrita como sendo diretamente proporcional a razão entre suas densidades e a razão dos tempos de escoamento através do capilar. A Equação 9 contém o princípio básico de operação de um viscosímetro de Ostwald, ou seja, utilizando-se de um mesmo aparato é possível determinar a viscosidade de um dado fluido 2 em relação a um outro 1 quando suas densidades e tempos de escoamento através de um capilar são conhecidos.

Determinação da viscosidade fluidos usando o método da coluna de Stokes

Um outro procedimento usado para a determinação da viscosidade de fluidos envolve a excitação do mesmo através de um corpo de prova. Para que essa idéia seja desenvolvida é necessário conhecer a lei de Stokes, que descreve o movimento de um objeto em um fluido viscoso. Vamos então experimentar a maneira mais simples de materializar a lei de Stokes. Assuma então um vaso de secção transversal cilíndrica preenchido parcialmente com um fluido a ser investigado, como mostrado na Figura 4. Suponha também que o objeto a ser utilizado aqui é uma esfera de raio r (por simplicidade de simetria) de um material metálico, e obviamente que não reaja quimicamente com o fluido quando posto em contato com ele. A esfera é abandonada logo acima do nível do líquido, como mostra a Figura 4, penetra no líquido e mantém o seu movimento vertical em direção ao fundo do vaso. Note que já existem algumas esferas no fundo do recipiente. Pois bem, vamos acompanhar este movimento. Ao penetrar no líquido, a esfera experimenta um movimento chamado de turbulento, como descrito acima e que será discutido também em sala de aula. Após este intervalo de tempo em que o movimento da esfera é difícil de ser avaliado, é melhor avaliar as forças atuando na esfera para um melhor entendimento do movimento, como descrito abaixo.

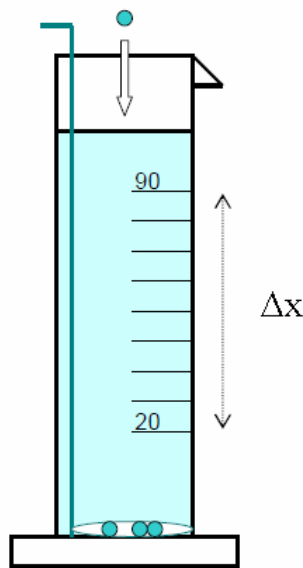


Figura 4 – Coluna ou vaso preenchido com um líquido específico. A figura mostra também que a coluna é graduada, onde um intervalo de comprimento Δx é mostrado.

As forças atuando nessa esfera depois de sua entrada no fluido podem ser visualizadas na Figura 5 mostrada abaixo. Vamos nos ater primeiramente a duas forças atuando na esfera: a gravitacional e a do empuxo. Nota-se que a força gravitacional

$$P = m_e g \quad (10)$$

onde m_e é a massa da esfera e g é a aceleração da gravidade, atua no sentido de deslocar a esfera verticalmente para baixo. Por outro lado, a força devido ao empuxo

$$E = (4/3)\pi r^3 \rho_f g \quad (11)$$

onde ρ_f é a densidade do fluido, atua no sentido oposto. A força gravitacional pode ser reescrita, utilizando-se da densidade da esfera ρ_e e toma a forma

$$P = (4/3)\pi \rho_e r^3 g . \quad (12)$$

Nessas circunstâncias, a força resultante é $F_R = P - E$ e pode ser escrita como

$$F_R = (4/3)\pi r^3 g (\rho_e - \rho_f) . \quad (13)$$

Note que quando a densidade da esfera for menor que a do fluido, a força resultante não terá mais o sentido vertical para baixo mas sim para cima. Vamos então admitir que o material de nossa esfera tenha densidade maior que a do fluido e então adquirirá movimento para baixo. Sendo assim, quando a esfera inicia seu movimento no interior do fluido, uma terceira força estará presente e atuará na esfera. Essa é a força viscosa (devido a lei de Stokes) e é escrita como

$$F_v = 6\pi\eta vr \quad , \quad (14)$$

onde η é a viscosidade do fluido, v é a velocidade da esfera e r o seu raio. Note que a força viscosa é proporcional à velocidade da esfera e atua no sentido oposto ao movimento da mesma, como mostra a Figura 5.

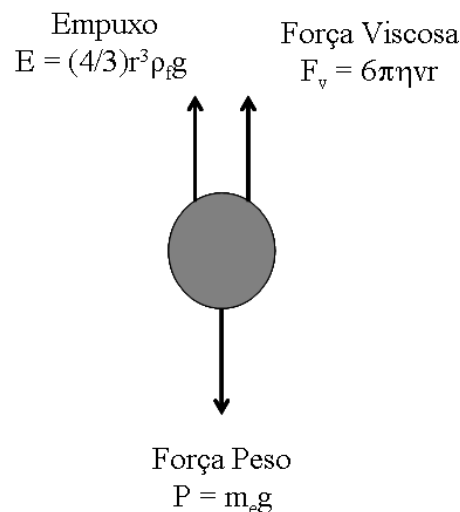


Figura 5 – Forças atuando em uma esfera que está mergulhada em um fluido arbitrário.

Após um breve intervalo de tempo em contato com o fluido, a velocidade da esfera não aumenta mais e torna-se constante. Nesse instante, o equilíbrio entre as forças é estabelecido e a força resultante atuando na esfera é nula. Essa velocidade constante pode ser obtida das equações descritas acima assumindo que $F_R = F_v$, ou seja

$$v = [(2/9)r^2 g(\rho_e - \rho_f)] / \eta \quad . \quad (15)$$

A Equação 15 indica que v varia com o quadrado do raio da esfera r^2 (ou corpo de prova). Isso significa que a alteração no raio da esfera, quando dobrado, por exemplo, leva a uma redução de quatro vezes no intervalo de tempo que a esfera leva para percorrer uma distância Δx , como

mostrado na Figura 4. A equação também informa que o raio de um objeto qualquer pode ser determinado através da medida de sua velocidade de sedimentação. Por outro lado, a Equação 15 é válida para condições bem determinadas e requer parâmetros ideais como uma quantidade muito grande de fluido, que as esferas tenham superfícies lisas e pequenos diâmetros. Isso tudo se resume a dizer que a equação é válida para situações em que o número de Reynolds da esfera ou corpo de prova não seja muito grande ($Re \lesssim 1$). A equação 15 pode ser reescrita como

$$\eta = [(2/9)r^2g(\rho_e - \rho_f)]/ v \quad . \quad (16)$$

que é a relação mais apropriada para a determinação da viscosidade absoluta do fluido. Isso implica em medir a velocidade de uma esfera, o que consiste em um procedimento corriqueiro em laboratórios. Para isso, é necessário utilizar uma coluna similar à mostrada na Figura 4 e medir o intervalo de tempo que a esfera leva para percorrer a distância Δx . Os outros parâmetros da Equação 9, as densidades do fluido e da esfera assim como os parâmetros geométricos da esfera, também são relativamente fáceis de serem medidos em laboratório. Sendo assim, através da observação do movimento de um corpo de prova num dado fluido, sua viscosidade pode ser determinada.

Procedimento Experimental – Uma Breve Discussão

Esse experimento tem como objetivo principal a determinação do coeficiente de viscosidade (ou da viscosidade) de líquidos. Isso está programado a ser feito através de dois métodos distintos: (1) da observação

temporal do escoamento de líquidos através de um capilar (viscosímetro de Ostwald), o que fornecerá a viscosidade (relativa) de algumas soluções em relação a um fluido conhecido; e (2) a determinação da viscosidade absoluta de um óleo através da observação do movimento de queda de esferas dentro deste óleo, ou seja, através do método da coluna de Stokes. Uma breve descrição dos dois experimentos é mostrada abaixo.

(1) A coluna de Stokes

A coluna de Stokes a ser utilizada no laboratório pode ser visualizada na Figura 4 mostrada acima. Ela compreende de um tubo cilíndrico circular que é preenchido com o fluido a ser investigado. Informações acerca do fluido, que é um óleo automotivo, são dadas no Apêndice A.

A coluna é equipada com uma fita métrica na sua lateral para que distâncias Δx possam ser marcadas e medidas. Cada grupo de estudantes terá a sua disposição uma coluna de Stokes para efetuar as medidas.

Alem da coluna de Stokes, cada grupo receberá dois conjuntos de esferas com diâmetros diferentes. As esferas são feitas de aço inoxidável e apresentam diâmetros e superfícies suficientemente regulares, imprescindível para o sucesso do experimento. Para a caracterização das grandezas de interesse das esferas (diâmetro e densidade), os estudantes receberão um paquímetro e deverão utilizar uma balança de uso comum. A densidade do óleo a ser investigado será inferida via a utilização de um densímetro, de uso comum a todos os grupos.

As atividades previstas nesse experimento podem ser assim resumidas (detalhes serão dados em sala de aula):

- (1) Medidas de diâmetros das esferas com o uso do paquímetro;
- (2) Medidas das massas das esferas com o uso de uma balança;
- (3) Estimativas das densidades das esferas de aço inoxidável;
- (4) Leitura da densidade do óleo a ser investigado;
- (5) Medidas da velocidade das esferas dentro da coluna de Stokes. Isso compreende medidas de tempo de queda, utilizando-se de cronômetros, e a medida do comprimento Δx (ver Figura 4).

(2) O viscosímetro de Ostwald

A determinação do coeficiente de viscosidade de duas soluções de ($\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$) em relação à viscosidade da H_2O será feita com o auxílio de um viscosímetro de Ostwald. Cada grupo de estudantes terá ao seu dispor

um viscosímetro para o desenvolvimento do experimento. As soluções de (H₂O + NaCl) assim como a H₂O deionizada serão de uso coletivo.

Densímetros serão utilizados para a determinação das densidades dos fluidos envolvidos no estudo. Adicionalmente, cada grupo de estudantes terá ao seu dispor dois cronômetros, pipetas e pequenos béqueres.

O experimento envolve leituras das densidades dos fluidos em estudo e tomadas de tempo de escoamento desses fluidos no viscosímetro de Ostwald. De posse desses resultados, e com o auxílio da Equação 9, as viscosidades relativas poderão ser obtidas. Detalhes acerca do viscosímetro de Ostwald e do procedimento experimental serão dados em sala de aula.

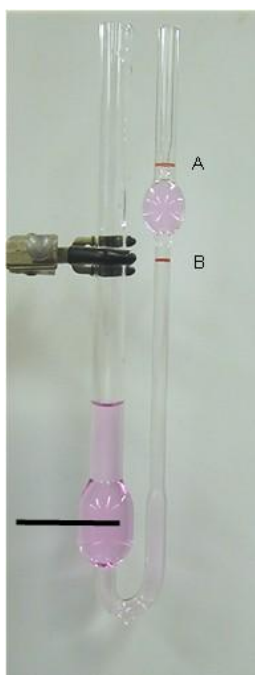


Foto ilustrativa de um viscosímetro de Ostwald.

Para quem tiver curiosidade, abaixo são citados assuntos de interesse e relacionados ao tema do experimento:

- (1) Dinâmica do Fluxo Sangüíneo;
- (2) Utilização do viscosímetro de Ostwald para a determinação de peso molecular de substâncias;
- (3) Centrifugação.

Apêndice A

Óleo Lubrax MG1 multi SAE 20W40

| Temperatura (°C) | Viscosidade (10⁻² Stokes) |
|-------------------------|---|
| 0 | 2000 |
| 10 | 800 |
| 20 | 400 |
| 30 | 210 |
| 40 | 128 |
| 50 | 80 |
| 60 | 50 |
| 70 | 36 |
| 80 | 25 |
| 90 | 18,5 |
| 100 | 14 |

Tabela I – Valores da viscosidade do óleo MG1 para diversas temperaturas entre 0 e 100 °C.

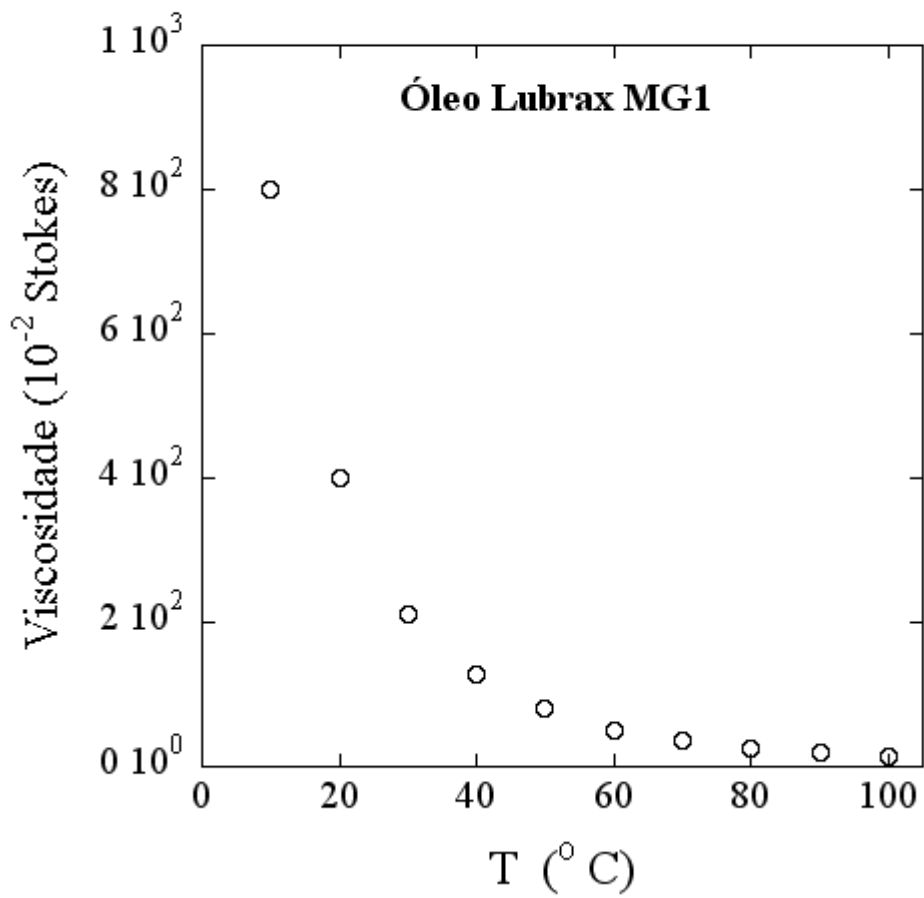
Tabela de conversão de unidades

Poise – Unidade de Viscosidade Absoluta – $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1}$

Stokes – Unidade de Viscosidade Científica – $\text{g cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{densidade}^{-1}$

$$\text{Poise} = \text{Stokes} \times \text{Densidade}$$

(desde que ambos sejam medidos a uma mesma temperatura)



Dependência da viscosidade do óleo Lubrax MG1 com a temperatura. Os dados foram retirados da Tabela I mostrada acima.