

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro



Matheus Rossi

Estudo e instrumentação para medidas de viscosidade



Rio Claro – SP

2020

AGRADECIMENTOS

É uma tarefa difícil agradecer a minha família já que oito anos de convivência deixaram ela com um tamanho gigantesco.

Gostaria de começar agradecendo ao meu orientador, o Prof. Dr. Giovani Gozzi pela paciência e pelos ensinamentos que me foram passados durante muitos anos de orientação, para além do laboratório e do palco.

Gostaria de agradecer também a minha mãe, Marlene Cristina Morente Rampin, e meu pai, Reginaldo Aparecido Rossi, pelo apoio sem o qual não seria possível ver essa jornada no fim.

Agora gostaria de agradecer a família que a UNESP me deu, uma família enorme que por mais que me esforce não é possível traduzir em algumas palavras o que foram anos de convivência e troca de experiências.

Aos meus amigos e colegas de palco do Show de Física que dividiram comigo o friozinho na barriga antes de cada espetáculo, à cada uma das escolas que com brilho nos olhos me lembravam o motivo de continuar pela ciência.

Ao que foi o maior projeto de extensão de todas as UNESPs, o cursinho ATHO, os professores e amigos que por ali passaram e me deram aquele empurrãozinho necessário na carreira docente, aos alunos e alunas que a cada aula me ensinaram mais do que pude aprender e como os primeiros que são nunca sairão da minha alma e serão sempre história na minha carreira.

Às mais de vinte pessoas que dividiram o mesmo teto que eu, me ensinaram a conviver com o igual e o diferente, o muito e o pouco, em especial Bruno Farias, André Ferrazzo, Pedro Martins, Matheus Quadros, Erick Vinicius, Sofia Brandão, Flavia Ferlin e Renan Borin.

A essas pessoas e a todas as outras que não couberam em espaço e palavras, mas estarão sempre na minha memória e no meu coração, muito obrigado!

RESUMO

_____ Neste estudo são descritos os conceitos básicos relacionados ao funcionamento de viscosímetros, mais especificamente o viscosímetro Hoppler, assim como conceitos básicos sobre viscosidade. Também são descritos os procedimentos experimentais para medidas de viscosidade utilizando o viscosímetro de Hoppler. Para aplicação da técnica foram produzidas soluções com diferentes viscosidades por meio da diluição de mel em água com diferentes concentrações. A partir da experimentação, a incerteza experimental na medição de viscosidade utilizando um viscosímetro de Hoppler foi obtida com valores inferiores a 4%.

ABSTRACT

In this study, we have shown basic concepts regarding viscosity measurements performed using a Hoppler viscometer and, in addition, we have shown some basic concepts regarding fluid viscosity. We also have discussed experimental procedures for viscosity measurements using a Hoppler viscometer. This technique was applied to characterization of different viscosities solutions obtained by dilution of honey in water. Furthermore, we have evaluated the experimental uncertainty in viscosity measurement using Hoppler viscometer as lower than 4%.

Lista de Símbolos

F Força tangencial

A Área da placa

V_x Velocidade da placa

t Tempo

σ Tensão de cisalhamento

V Velocidade

γ Tensão de cisalhamento para qualquer tempo

ν Viscosidade cinemática

μ Viscosidade absoluta

ρ Densidade do líquido

φ Densidade da esfera

r Raio da esfera

g Gravidade

P Força peso

E Empuxo

S Força de arraste viscoso

θ Desvio padrão

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. Revisão Bibliográfica.	7
1.1. Fluidos.....	7
1.2. Viscosidade	13
1.3. Viscosímetro de Stokes	16
3. MATERIAIS E MÉTODOS.	19
4. RESULTADO.	23
5. CONCLUSÕES.	27
6. BIBLIOGRAFIA.	28

1. INTRODUÇÃO

Desde a descoberta de propriedades eletrônicas em materiais poliméricos no final do século XX [1], estes materiais são cogitados para a produção de dispositivos eletrônicos empregando-se técnicas de impressão gráfica [2-4]. As principais vantagens destas técnicas de processamento são o baixo custo de implantação e compatíveis com a produção em larga escala. Além disso, os dispositivos de eletrônica orgânica e impressa, podem ser flexíveis, ultrafinos, leves e transparentes, possibilitando novas aplicações, como em embalagens inteligentes e em displays flexíveis [5], por exemplo.

As técnicas de impressão gráfica empregadas em eletrônica impressa utilizam materiais líquidos como soluções e suspensões para a produção de filmes com propriedades eletrônicas. Sendo assim, as propriedades destas soluções, como viscosidade e tensão superficial, devem ser controladas para a produção dos filmes eletrônicos [6]. Deste modo, a determinação e controle de viscosidade é um fator relevante para a área de eletrônica impressa.

Neste estudo, apresentamos uma revisão bibliográfica abordando os fundamentos básicos sobre viscosidade de líquidos e sobre medições de viscosidade utilizando viscosímetro de Stokes, também conhecido como viscosímetro Hoppler ou viscosímetro de esferas. Além disso, realizamos medições de viscosidade empregando um viscosímetro Hoppler e soluções com viscosidades em todo o intervalo de medição do instrumento. A partir destas medições, verificamos que a principal fonte de incerteza experimental se deve a falhas humanas, contudo não supera 3,6%.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Fluidos

A classificação dos fluidos depende de uma grande quantidade de fundamentos associados ao comportamento dessa classe de materiais, como descrições do meio contínuo, equações constitutivas, forças de superfície etc [8]. Deste modo, os fluidos podem ser definidos de diversas maneiras. Neste estudo, os fluidos serão definidos como:

“Um material é dito fluido quando se deforma indefinidamente ao ser submetido a uma tensão (tangencial) de cisalhamento, por menor que ela seja”

Esta definição foi convenientemente adotada por definir os fluidos em termos de deformações associadas a tensões de cisalhamento, onde estes fundamentos são fundamentais para a representação física do funcionamento de um viscosímetro Hoppler. Para ilustrar a definição acima, as figuras 1 e 2 comparam o comportamento de sólidos e de fluidos quando submetidos a uma força tangencial $\vec{F}$ que dá origem à tensão tangencial aplicada sobre o material é $\frac{\vec{F}}{A}$ [8]. Onde A representa a área superficial do sólido ou do fluido sobre a qual se aplica a força tangencial.

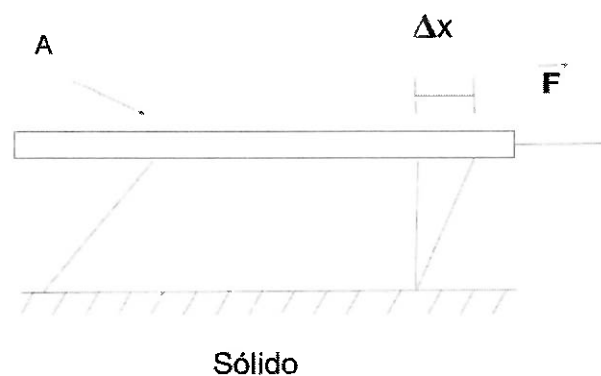


Figura 1: Esquema representando um material sólido sob a ação de uma força tangencial $\vec{F}$

No esquema mostrado na figura 1, um material sólido está posicionado entre um plano horizontal fixo em repouso e uma placa horizontal com área A de contato com o sólido. As superfícies do material são vinculadas às superfícies de contato e não apresentam deslocamentos relativos a estes componentes. Deste modo, uma vez que a placa móvel está sujeita a uma força tangencial $\vec{F}$, o material sólido sofrerá uma deformação finita ($\Delta\chi$) e uma força elástica restauradora estabelecerá equilíbrio estático ao sistema.

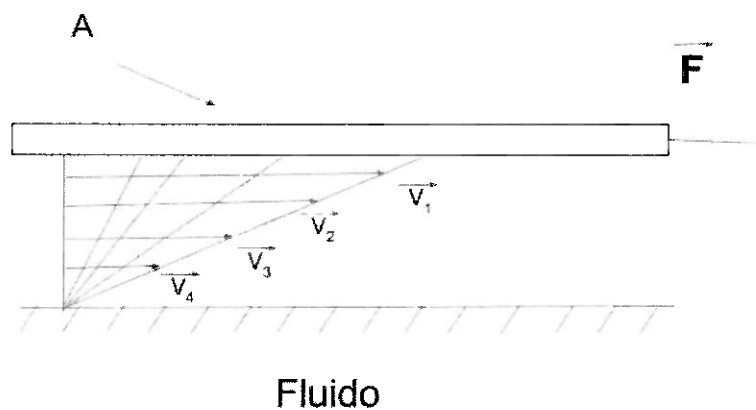


Figura 2: Cada camada do fluido adquire uma velocidade diferente

A figura 2 representa um sistema semelhante ao anterior, onde um fluido é posicionado entre o plano horizontal fixo em repouso e a placa móvel. Analogamente, não há deslocamentos relativos nas superfícies de contato e a placa móvel é sujeita a uma força tangencial $\vec{F}$. Contudo, neste caso, o material fluido irá se deformar de maneira contínua enquanto $\vec{F}$ estiver atuante, não havendo uma força restauradora que leve ao equilíbrio estático [8]. No caso específico dos fluidos, há uma transferência de quantidade de movimento molecular (ou viscoso) entre as camadas do fluido em movimento laminar. Essa transferência de quantidade de movimento se dá ao fato de que as moléculas da camada em contato com a placa móvel não apresentam movimento relativo em relação à placa. Isto é, na interface de

contato com a placa móvel as moléculas do fluido se deslocam com a mesma velocidade da placa móvel. Nesta camada de contato, as moléculas se deslocam com maior velocidade e interagem com as moléculas de camadas mais distantes da placa móvel. Deste modo, as moléculas de camadas mais distantes da placa móvel se deslocam com menor velocidade. Por outro lado, o material em camadas mais distantes da placa móvel oferece uma resistência ao movimento do material em camadas mais próximas à placa móvel [9].

As figuras 3, 4, 5 e 6 exemplificam o fenômeno de transferência de quantidade de movimento considerando um sistema onde um fluido encontra-se contido entre duas placas separadas por uma pequena distância, novamente a placa inferior é um plano fixo em repouso enquanto que a placa superior se move a uma velocidade $\vec{V}_x$.

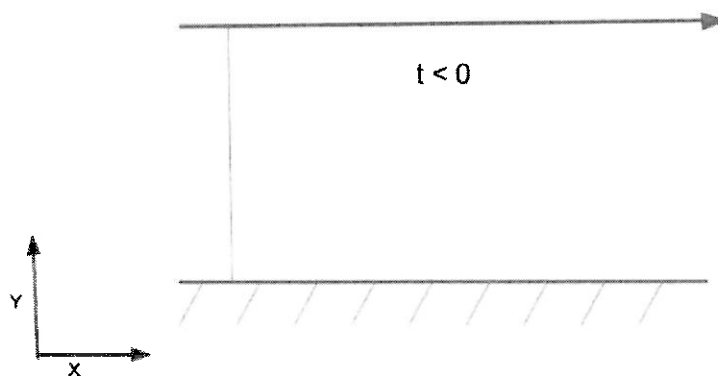


Figura 3: Esquema representando um material fluido entre duas placas paralelas no instante $t < 0$

No esquema representado pela figura 3, no momento $t < 0$, considera-se o sistema em repouso, quando nenhuma transferência de quantidade de movimento ocorreu ainda. Portanto, nesta condição, a camada laminar do fluido em contato com a placa móvel, assim como a placa móvel, não está em movimento.

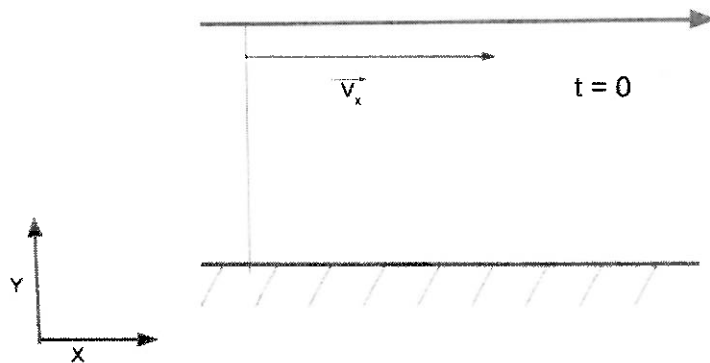


Figura 4: Esquema representando um material fluido entre duas placas paralelas no instante $t = 0$

Já no momento $t = 0$, representado pela figura 4, o movimento da placa móvel é iniciado e o processo de transferência de quantidade de movimento se inicia. Nesta condição a transferência de quantidade de movimento ocorre apenas na superfície de contato entre o fluido e a placa móvel (conforme representado pelo vetor velocidade). Em nosso esquema, o fluido se desloca na direção x com sentido positivo, que é a mesma direção e sentido do deslocamento da placa móvel.

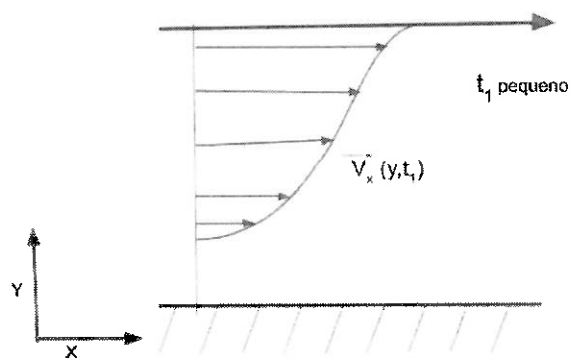


Figura 5: Esquema representando um material fluido entre duas placas paralelas no instante t_1 pequeno

Após determinado tempo, em um instante t_1 , representado na figura 5, se estabelece o regime de escoamento transitório [14]. Neste regime, a quantidade de movimento é gradualmente transferida entre as camadas do fluido, mas a distribuição de velocidades ao longo do volume do fluido não é uniforme.

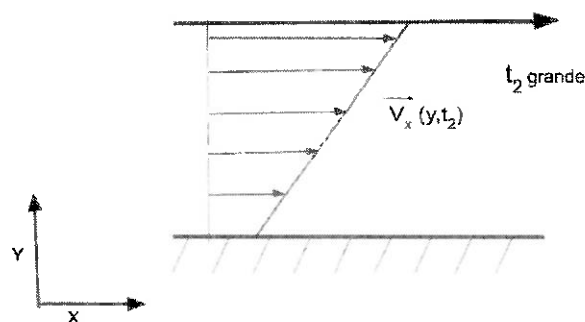


Figura 6: Esquema representando um material fluido entre duas placas paralelas no instante t_2 grande

A figura 6 representa um momento posterior, t_2 , no qual se estabelece o regime de escoamento permanente [14]. Neste regime, as camadas do fluido se deslocam com velocidade constante e uniformemente distribuídas ao longo do material [12]. Como condições de contorno, nesta situação, a camada do fluido em contato com a placa móvel se desloca com a mesma velocidade da placa, enquanto que a camada em contato com a placa fixa não se move. Então, como as diferentes camadas ao longo do volume do fluido se deslocam com velocidades distintas e interagem entre si, surgem forças de contato que atuam de maneira tangencial à superfície de cada camada. Essas forças tangenciais são chamadas de forças de cisalhamento [12]. Geralmente, este fenômeno é representado em termos de uma tensão de cisalhamento, σ , a qual se relaciona com a força de cisalhamento conforme descrito a equação (1),

$$\sigma = \frac{d\vec{F}}{dA} \quad . \quad (1)$$

1.2. Viscosidade

A viscosidade é uma característica fundamental dos fluidos que representa a proporcionalidade entre tensão tangencial e taxa de deformação (transferência da quantidade de movimento) [8]. Porém esta propriedade se manifesta de maneira distinta em se tratando de líquidos ou de gases devido a grande diferença de viscosidade destes materiais [9]. Como a viscosidade também pode ser definida como a resistência que o fluido oferece às forças de cisalhamento, um fluido mais viscoso oferece maior resistência às forças e ao escoamento do que um fluido menos viscoso. Adicionalmente, deve-se considerar que a resistência ao cisalhamento apresentada pelos fluidos depende de dois principais fatores, a coesão entre as moléculas do fluido e a taxa de transferência de quantidade de movimento molecular.

A principal característica que diferencia os líquidos de gases é que no caso dos líquidos a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, enquanto para os gases ocorre o oposto. Nos líquidos as forças de coesão são muito mais intensas do que nos gases e, por outro lado, nos gases ocorre maior transferência de movimento entre as moléculas. Como as forças de coesão diminuem com o aumento da temperatura enquanto a transferência de movimento molecular aumenta, a viscosidade dos líquidos diminui com o aumento da temperatura e a dos gases aumenta [9].

Neste estudo discutiremos medidas de viscosidade em líquidos, os quais são classificados em termos da dependência entre a viscosidade e a tensão de cisalhamento. Os líquidos newtonianos e os fluidos plásticos ideais apresentam viscosidade independente da tensão de cisalhamento aplicada. Por outro lado, os líquidos não-newtonianos apresentam viscosidade dependente da tensão de cisalhamento aplicada [8]. O gráfico ilustrado na figura 7 mostra curvas dos dois tipos de fluidos para os quais a viscosidade não depende da tensão de cisalhamento, e suas respectivas relações de tensão por taxa de deformação. Nesta figura verifica-se que a principal diferença entre os tipos é que os fluidos newtonianos apresentam proporcionalidade entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento para quaisquer valores de tensão de cisalhamento. Por outro lado, os fluidos plásticos ideais apresentam esta relação de proporcionalidade apenas para valores de tensão de cisalhamento superiores a um valor limiar.

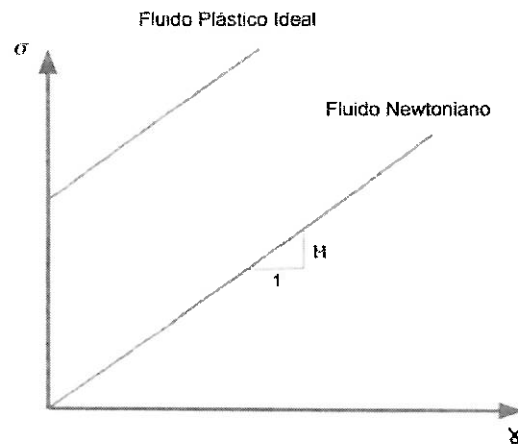


Figura 7: Gráfico de tensão de cisalhamento x taxa de deformação

Dentre as categorias de líquidos, os newtonianos são a maioria dos líquidos existentes e de interesse das ciências da natureza e engenharias, alguns exemplos de fluidos newtonianos são: água, as, glicerina, óleos, etc [8]. Neste caso, a viscosidade é determinada pela relação entre a taxa de deformação e a tensão de cisalhamento. A viscosidade absoluta, ou viscosidade dinâmica, exprime a relação entre força por unidade de superfície que se dá entre duas camadas paralelas de um fluido em movimento laminar. Para ilustrar o sistema de movimento laminar a figura 8 representa duas camadas de um fluido que realizam troca de quantidade de movimento. Neste caso, a camada A assume uma velocidade $\vec{V}_1$ e transfere quantidade de movimento para a camada B que, por sua vez, assume uma velocidade $\vec{V}_2$. Assim, a viscosidade absoluta pode ser representada matematicamente como apresentado nas equações (2) e (3).

$$\sigma = \mu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (2)$$

e

$$\sigma = \mu \cdot \gamma \quad (3)$$

onde σ representa a tensão tangencial, μ representa a viscosidade absoluta ou viscosidade dinâmica e a derivada, ou γ , representa a taxa de deformação [8].

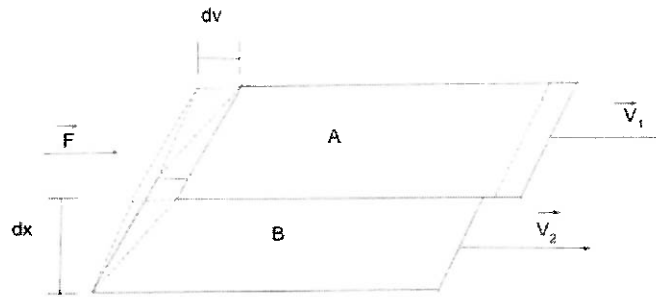


Figura 8: Esquema de camadas paralelas de um fluido em movimento laminar

A viscosidade cinemática é uma representação alternativa, a qual é obtida a partir da viscosidade absoluta e da densidade do fluido [7,8], sendo ambas consideradas à mesma condição de temperatura e pressão [10]. A viscosidade cinemática é definida como a razão entre a viscosidade absoluta e a densidade de líquido, conforme apresentado na equação (4),

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4)$$

sendo ν a viscosidade cinemática e ρ a densidade do líquido. Deste modo, a viscosidade cinemática pode ser definida em analogia às equações (2) como segue na equação (5).

Com isso temos a forma final em:

$$\sigma = \rho \cdot \nu \cdot \frac{\partial V_x}{\partial y} \quad (5)$$

1.3. Viscosímetro de Stokes

Viscosímetros são os instrumentos utilizados para medir a viscosidade de líquidos. Esses instrumentos podem ser divididos em dois grandes grupos: primário e secundário. Os viscosímetros primários são aqueles que têm a capacidade de fazer uma medida direta da tensão e da taxa de deformação do fluido, já os viscosímetros secundários fazem uma medida indireta da razão entre tensão aplicada e taxa de deformação [10]. Os viscosímetros de queda, também nomeados como viscosímetros de Stokes, são viscosímetros secundários nos quais um corpo sólido é posto em queda, sob efeito da gravidade, em um meio líquido viscoso. Embora qualquer corpo sólido possa ser utilizado, é geralmente recomendável que se utilize um corpo esférico [7].

A figura 9 esquematiza um corpo esférico em queda em fluido viscoso, assim como as forças que atuam sobre o corpo esférico. Neste caso, $\vec{P}$ representa a força peso em termos do raio da esfera, r , e de sua densidade, φ . O empuxo relacionado com a densidade do meio, ρ , e com o volume da esfera é representado por $\vec{E}$. Por fim, $\vec{S}$ representa a força de arraste viscoso, a qual depende da viscosidade absoluta do meio, μ , segundo a lei de Stokes. Assim encontra-se as seguintes equações

$$\vec{P} = \frac{4}{3} \pi r^3 \varphi \vec{g} \quad , \quad (6)$$

$$\vec{E} = - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \vec{g} \quad (7)$$

e

$$\vec{S} = - 6 \pi r \mu \vec{V} \quad . \quad (8)$$

Nestas equações, $\vec{g}$ representa a aceleração de atração gravitacional e $\vec{V}$ representa a velocidade de deslocamento da esfera.

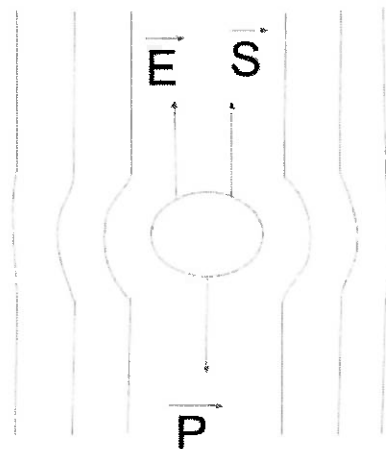


Figura 9: Corpo esférico em queda livre envolto de fluido viscoso

Neste sistema, a força peso e empuxo apresentam magnitudes constantes, enquanto a força de arraste viscoso apresenta magnitude proporcional à velocidade de queda da esfera. Deste modo, a esfera apresenta movimento acelerado até que as forças que atuam sobre a esfera entrem em equilíbrio. Deste modo, medindo-se a velocidade terminal do corpo em queda é possível obter a viscosidade do líquido indiretamente. De forma geral, o movimento da esfera pode ser representado pela segunda lei de Newton (equação 9), a qual no equilíbrio é descrita pela equação (10). Assim,

$$\sum \vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{V}}{dt} \quad (9)$$

e

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (10)$$

Levando-se em consideração as forças que atuam em um viscosímetro de Stokes, a equação 10 pode ser reescrita conforme apresentado nas equações abaixo.

$$\vec{P} + \vec{E} + \vec{S} = 0 \quad , \quad (11)$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \varphi \vec{g} - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho \vec{g} - 6 \pi r \mu \vec{V} = 0 \quad (12)$$

e

$$6 \pi r \mu \vec{V} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\varphi - \rho) \vec{g} \quad . \quad (13)$$

Deste modo, a viscosidade do meio, μ , pode ser obtida conforme apresentado na equação

$$\mu = \frac{2 \|\vec{g}\| r^2 (\varphi - \rho)}{9 \|\vec{V}\|} \quad . \quad (14)$$

Contudo, no regime inercial, a velocidade de queda pode ser determinada medindo-se o tempo, t , de queda necessário para promover determinado deslocamento, y , da esfera. Deste modo, a equação 14 pode ser reescrita em termos do tempo de queda, como apresentado nas equações a seguir

$$\mu = \frac{2 \|\vec{g}\| r^2 (\varphi - \rho)}{9 \frac{y}{t}} \quad , \quad (15)$$

$$\mu = \kappa (\varphi - \rho) t \quad (16)$$

e

$$\kappa = \frac{2 \|\vec{g}\| r^2}{9 y} \quad . \quad (17)$$

Onde a equação 16 é a equação básica para determinação da viscosidade de líquidos utilizando um viscosímetro de Stokes, que também é conhecido como viscosímetro Hoppler ou de esfera [11]. Nesta equação, identifica-se que a viscosidade do líquido é determinada a partir de uma medida de tempo. Em termos

práticos, o tempo t é medido como aquele necessário para que a esfera se desloque entre duas posições fixas a e b do cilindro [7].

3. MATERIAIS E MÉTODOS.

Para a realização deste trabalho, foi utilizado um viscosímetro de Hoppler, que funciona com base nos princípios do viscosímetro de queda de Stokes. O viscosímetro utilizado está representado na figura 10 e é composto basicamente por um tubo interno (1), tubo de medida, onde o líquido cuja viscosidade será determinada é inserido. Neste tubo, também é inserida a esfera (2) e são estabelecidas as posições de referência para determinação do tempo de deslocamento. Por fim, o cilindro mais externo (3) é utilizado para circulação de um fluido para controle de temperatura.

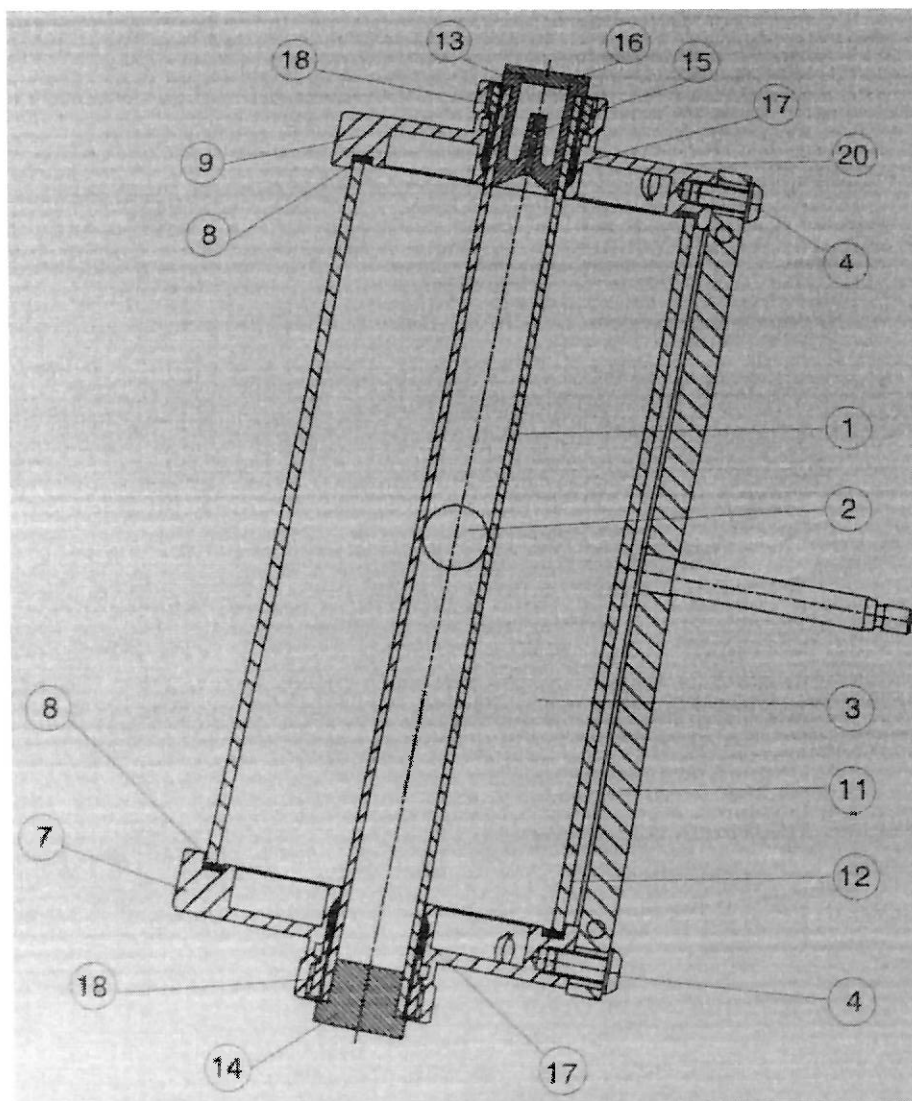


Figura 10: Esquema geral de um viscosímetro de Hoppler

Para as medições, seguiu-se o método descrito no manual do viscosímetro de queda *"Instruction Manual Falling Ball Viscosimeter C"* [12]. Considerando o esquema representado pela figura 10 o processo se inicia despejando uma amostra da solução viscosa de aproximadamente 45 cm³ dentro do tubo de medida. Isso deve garantir que o líquido preencha o tubo de medidas até aproximadamente 20 mm abaixo da extremidade. A esfera adequada para a medida é então solta dentro do tubo de medida e, em seguida, se encaixa o tampão (13), dessa forma o líquido deve alcançar um nível um pouco mais alto que o capilar (15).

É importante mencionar que antes de tomar nota dos dados é necessário atentar se todas as partes do viscosímetro que entrarão em contato com a amostra

devem estar limpas e secas, também se a amostra não contém bolhas de ar e é ideal que a esfera se mova por toda a extensão do tubo pelo menos duas vezes (ida e volta), para otimizar a homogeneidade da amostra antes da coleta de dados.

O viscosímetro utilizado neste estudo permite medidas de viscosidade no intervalo de 7 mPa.s a 75 Pa.s. Contudo, para a realização de medições nos diferentes intervalos de viscosidade deve-se empregar esferas distintas, conforme apresentado na tabela 2. Deste modo, para cada esfera deve-se considerar uma constante k determinada pelo fabricante do equipamento.

Esfera	Densidade (g/cm ³)	Diâmetro (mm)	Constante K (mPa.s.cm ³ /g.s)	Intervalo Recomendado para Medida (mPa.s)
Vidro Sílica 1	2,2	15,625	0,09	7 - 130
Vidro Sílica 2	2,2	15,798	0,007	0,6 - 10
Metal Maior 1	8,1	14,994	0,7	200 - 4800
Metal Maior 2	8,1	15,561	0,09	30 - 700
Metal Menor 1	7,7 - 8,1	13,54	4,5	800 - 10000
Metal Menor 2	7,7 - 8,1	10,003	33	6000 - 75000

Tabela 2: Dados e características das esferas que compõem o kit do viscosímetro de Hoppler

Os dados de tempo de queda são coletados utilizando um cronômetro, o tempo medido é o tempo necessário para que a esfera saia do anel de marcação A e passe pelo anel de marcação B, a marcação C indica a meia distância entre A e B, como mostra a figura 11. Recomenda-se que o tempo deva ser iniciado e parado no momento em que a periferia inferior da esfera passe pelas marcações, mas não é regra, em líquidos mais escuros é recomendado que se utilize o equador da esfera como referência. Ainda, se o líquido for muito viscoso de modo que a medição se torne longa demais, é possível utilizar apenas o trajeto AC ou CB.

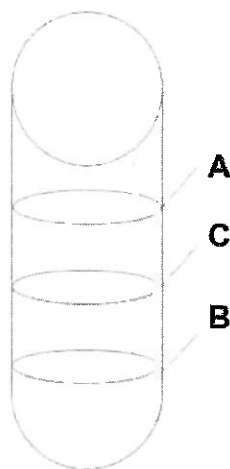


Figura 11: Representação do tubo interno do viscosímetro e suas marcações de distância

Uma vez que a esfera finalizou o percurso, o cilindro de medida é rotacionado em 180° para que a esfera retorne a sua posição original, o tempo que leva o trajeto de retorno também é uma medida. Para que o tempo de retorno seja utilizado com mais exatidão, deve-se realizar correções da constante K, conforme descrito na equação (19).

$$K_{\text{retorno}} = \frac{\text{tempo de queda normal} \cdot \text{constante } K \text{ normal}}{\text{tempo de queda do retorno}} \quad (19)$$

Para a realização de medições em um grande intervalo de viscosidades e avaliar a incerteza experimental em tais medições, preparamos diversas soluções de mel diluído em água conforme apresentado na tabela 7. As densidades destas soluções foram determinadas a partir de medidas de massa realizadas para 1 mL de cada uma das soluções e calculadas conforme descrito na equação 20 [14].

$$\rho = \frac{m}{\varepsilon} \quad .$$

(20)

Sendo m a massa e ε o volume.

Solução	Mel (%)	Água (%)
#1	90	10
#2	80	20
#3	50	50
#4	0	100

Tabela 1: Soluções planejadas na estratégia de experimentação

Neste trabalho, as propagações de incertezas adotadas estão apresentadas na equação 21.

$$\theta_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \theta_x^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \theta_y^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \theta_z^2 + \dots} \quad (21)$$

Onde θ_f representa a incerteza na determinação de uma grandeza a partir de uma função $f(x, y, z, \dots)$, θ_x representa a indeterminação da variável x , θ_y representa a indeterminação da variável y e assim sucessivamente [13].

4. RESULTADOS

Inicialmente, caracterizamos as esferas que compõem o viscosímetro Hoppler com respeito ao diâmetro e à densidade. O diâmetro das esferas foi aferido com um micrômetro digital com resolução de $\pm 1 \mu\text{m}$. As massas das esferas foram medidas com uma balança analítica com resolução de $\pm 0,1 \text{ mg}$. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3.

Esfera	Massa (g) ($\pm 0,0001$)	Diâmetro (mm) ($\pm 0,001$)	Volume (mm^3)	Incerteza Volume (%)	Densidade (g/cm^3)	Incerteza Densidade (%)
Vidro Sílica 1	4,4527	15,625	$1997,4 \pm 0,8$	0,04	$2,232 \pm 0,001$	0,04
Vidro Sílica 2	4,6120	15,798	$2064,4 \pm 0,8$	0,04	$2,234 \pm 0,001$	0,04
Metal Maior 1	14,3771	14,994	$1765,0 \pm 0,7$	0,04	$8,145 \pm 0,003$	0,04
Metal Maior 2	16,0034	15,561	$1972,9 \pm 0,8$	0,04	$8,111 \pm 0,003$	0,04
Metal Menor 1	10,0292	13,540	$1299,7 \pm 0,6$	0,05	$7,723 \pm 0,003$	0,04
Metal Menor 2	4,0411	10,003	$524,1 \pm 0,3$	0,06	$7,722 \pm 0,005$	0,06

Tabela 3: Dados medidos e características das esferas que compõem o kit de experimentação do viscosímetro de Hoppler

Na tabela 4 apresentamos as características das soluções preparadas. Nesta tabela verifica-se que foram produzidas soluções com concentração massa/massa de mel em água de 90, 80, 51 e 0%. Além disso, a densidade das soluções variou entre $0,98$ e $1,33 \text{ g/cm}^3$ com incertezas de no máximo 1%.

Solução	Mel (g) ($\pm 0,1 \text{ mg}$)	Água (g) ($\pm 0,1 \text{ mg}$)	Concentração Mel (massa/massa)	Incerteza Concentração (%)	Densidade (g/cm^3)	Incerteza Densidade (%)
#1	54,2020	5,9600	$0,900934 \pm 0,000003$	$3,3 \times 10^{-4}$	$1,33 \pm 0,01$	0,75

#2	48,1923	11,8931	$0,802063 \pm 0,000002$	$2,5 \times 10^{-4}$	$1,25 \pm 0,01$	0,80
#3	30,2071	28,9614	$0,510527 \pm 0,000002$	$3,9 \times 10^{-4}$	$1,07 \pm 0,01$	0,93
#4	0,0000	60,2246	0,000000	0,0	$0,98 \pm 0,01$	1,02

Tabela 4: Soluções criadas para seguir a estratégia de experimentação

Em um viscosímetro Hoppler os tempos de queda de esferas nessas diferentes soluções foram aferidos e as viscosidades das soluções foram calculadas utilizando a equação 16. Os valores dos tempos de queda e as viscosidades das soluções estão presentes na tabela 5 e na figura 11.

Solução	Esfera	Tempo de Queda (s) (± 1 s)	Viscosidade (mPa.s)
#1	Metal Maior 1	825	3933 ± 9
		815	3885 ± 9
		870 (T_R)*	3885 ± 9
			Média: 3901 Desvio Padrão: 28 Incerteza (%): 0,7
#2	Vidro Sílica 1	1471	130 ± 2
		1568	138 ± 2
		1583 (T_R)*	138 ± 2
			Média: 138 Desvio Padrão: 5 Incerteza (%): 3,6
#3	Vidro Sílica 1	105	$11,0 \pm 0,1$
		111	$11,6 \pm 0,1$
		113	$11,8 \pm 0,1$
			Média: 11,6 Desvio Padrão: 0,4 Incerteza (%): 3,4
#4	Vidro Sílica 2	88	$0,77 \pm 0,01$
		87	$0,76 \pm 0,01$
		87	$0,76 \pm 0,01$
			Média: 0,76 Desvio Padrão: 0,005 Incerteza (%): 0,7

Tabela 5: Dados experimentais de tempo de queda e viscosidade das soluções

* T_R : é o tempo de retorno da esfera, que também é usado como dado de tempo de queda

Na tabela 5 verifica-se que as incertezas nas medições individuais, as quais têm origem na resolução dos instrumentos, foi inferior ao desvio padrão dos conjuntos de medições. Este resultado indica que os erros aleatórios são mais significativos que a propagação de incertezas instrumentais. Provavelmente, esses erros aleatórios têm origem e falha humana na tomada de medidas de tempo, as quais podem ocorrer por atrasos no acionamento do cronômetro ou erros na identificação do momento em que as esferas cruzam as linhas de referência do instrumento. Contudo, mesmo havendo essa susceptibilidade a falha humana as medidas de viscosidade foram realizadas com incerteza inferior a 3,6%.

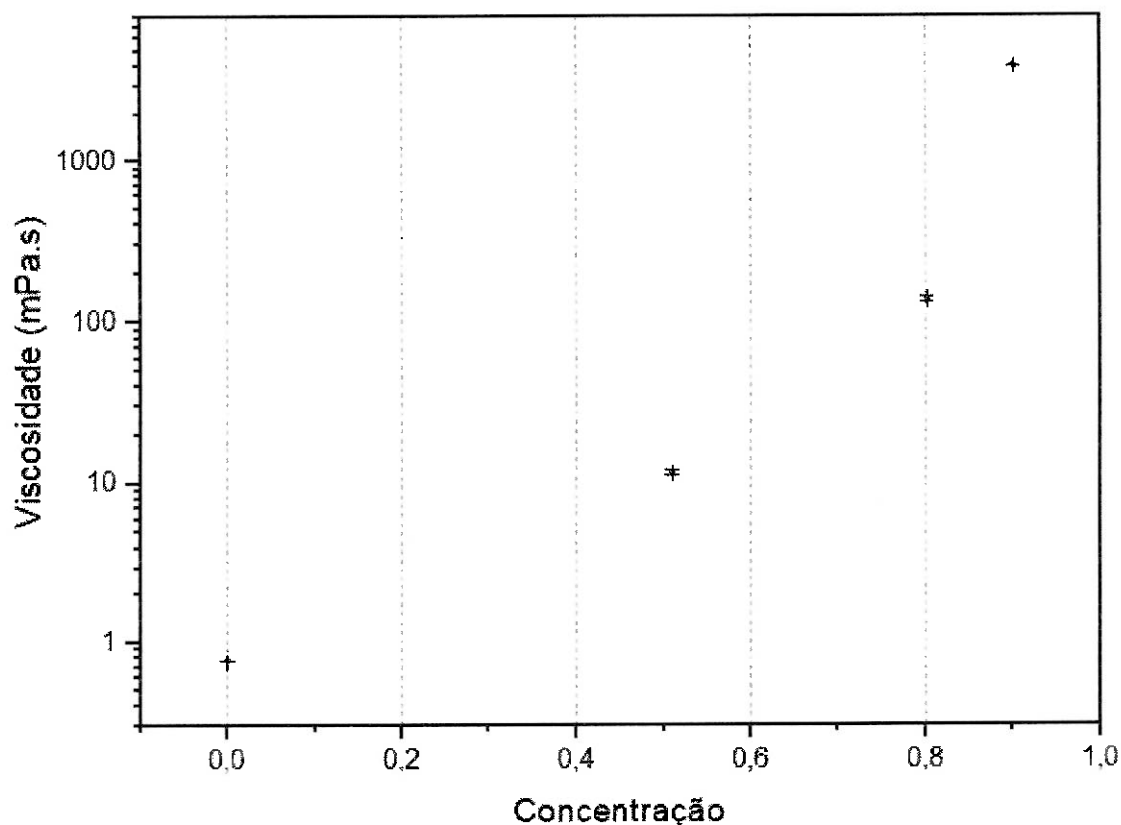


Figura 12: Gráfico de viscosidade x Concentração

Na figura 12 verifica-se um típico comportamento de aumento da viscosidade da solução com o aumento da concentração de soluto. Além disso, verifica-se que a

solução com maior concentração de mel (90%) apresentar viscosidade próxima à esperada 6300 mPa.s¹ [15].

5. CONCLUSÕES.

Este estudo apresenta os fundamentos básicos relacionados ao conceito de viscosidade e sobre a técnica de medição de viscosidade empregando um arraste viscoso. Neste sentido, este estudo apresenta os principais fundamentos e os procedimentos experimentais para determinação de viscosidade empregando viscosímetros de Hoppler, também conhecidos como viscosímetros de esferas ou de Stokes.

Adicionalmente, foram preparadas soluções de mel em água com diferentes concentrações de mel (de 0 a 90% massa/massa). Com estas soluções foram realizadas medições de viscosidade no intervalo de $0,760 \pm 0,005$ mPa.s e $3,9 \pm 0,3$ Pa.s. A partir desses resultados avaliamos a incerteza experimental em medições de viscosidade empregando-se o viscosímetro Hoppler como 3,6% ou inferior. Adicionalmente, identificamos que esta incerteza experimental está associada a falha humana durante as medições de tempo.

¹ Viscosidade de referência para o mel puro.

6. BIBLIOGRAFIA.

- [1] CHIANG, C. et al. *Electrical-conductivity in doped polyacetylene*. Physical Review Letters, v.19, n. 8, p. 4140–4148, 1977.
- [2] LI, M.; LI, Y.; LI, D.; LONG, Y. *Recent developments and applications of screen-printed electrodes in environmental assays – A review*. Analytica Chimica Acta, v. 734, p. 31-44, 2012.
- [3] HUANG, D. C. and J.; BRADLEY, D.; CAMPBELL, A. *High performance, flexible polymer light-emitting diodes (PLEDs) with gravure contact printed hole injection and light emitting layers*. Organic Electronics, v.11, n. , p. 1088–1095, 2010.
- [4] SONDERGAARD, R. R.; HOSEL, M.; KREBS, F. C. *Roll-to-roll fabrication of large area functional organic materials*, Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. V. 51, p. 16-34, 2013.
- [5] SIRRINGHAUS, H; TESSLER, N; FRIEND, R. H. *Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers*, SCIENCE, v. 280, p. 1741-1744, 1998.
- [6] KREBS, F.C. *Fabrication and processing of polymer solar cells: A review of printing and coating techniques*. Solar Energy Materials & Solar Cells, v. 93, p. 394–412, 2009.
- [7] VISWANATH, Dabir S; GHOSH, Tushar K; PRASAD, Dasika H. L; DUTT, Nidamarty V. K; RANI, Kalipatnapu Y. *Viscosity of Liquids: Theory, Estimation, Experiment, and Data*. Dordrecht: Springer. 2007.
- [8] GOBBI, Mauricio; DIAS, Luis Nelson; MASCARENHAS, Flavio; VALENTINE, Enise. *Introdução à Mecânica dos Fluidos e aos Fenômenos de Transporte*.
- [9] COIMBRA, Alberto Luiz. *Mecânica dos Fluidos*. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais. 2015.
- [10] SILVA, Guilherme Carvalho; OLIVEIRA, Moisés Gregório. *Dimensionamento de Queimador de Óleo Lubrificante Usado*. Orientador: Prof. Sérgio Leite Lopes, M.Sc. 2005. 83 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2005.
- [11] HAAKE. *Instruction Manual Falling Ball Viscometer C. Paramus*.
- [12] MALISKA, Ana Maria. *Efeito da Concentração, Massa Molar e Temperatura nas Propriedades Reológicas de Soluções de Dextranas*. Orientador: Prof. Vitor Hugo F. dos Santos, Dr. 1988. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Físico-Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1988.
- [13] ROUAUD, Mathieu. *Probability, Statistics and Estimation: Propagation of Uncertainties in Experimental Measurement*. 2013.
- [14] CARRON, Wilson; GUIMARÃES, Osvaldo. *As Faces da Física*. 3. ed. Belenzinho: Moderna. 2009
- [15] ANTON PAAR. *Viscosity of Flower Honey (Blended)*. Conteúdo, dados e características de tipos de mel direcionado a comerciantes e indústrias. Disponível em: wiki.anton-paar.com. Acesso em: 26 de janeiro de 2021.