

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Física

Construção de um instrumento para determinação de viscosidade por meio da compressão de fluido entre placas planas

Diego Vieira da Silva

Prof(a).Dr(a). Giovani F. Gozzi (orientador)

Rio Claro (SP)

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus de Rio Claro

Diego Vieira da Silva

Construção de um instrumento para determinação de
viscosidade por meio da compressão de fluido entre placas
planas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -
Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção
do grau de Licenciado em Física.

Rio Claro - SP

2022

S586c

Silva, Diego Vieira da

Construção de um instrumento para determinação de viscosidade por meio da compressão de fluido entre placas planas / Diego Vieira da Silva. -- Rio Claro, 2022
28 p.

Trabalho de conclusão de curso (Licenciatura - Física)
- Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: Giovani F. Gozzi

1. Viscosímetro. 2. Instrumento de medida. 3. Fluido. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Diego Vieira da Silva

Construção de um instrumento para determinação de viscosidade por meio da compressão de fluido entre placas planas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Campus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Giovani Gozzi (Orientador)

Prof. Dr. Luiz Antonio Barreiro

Prof. Dr. Makoto Yoshida

Rio Claro, 7 de fevereiro de 2022.

Diego Vieira da Silva

Assinatura do aluno



Assinatura do orientador

Resumo

A ascensão da eletrônica impressa, que utiliza materiais processados na forma líquida, traz a necessidade do controle de viscosidade dos materiais para a obtenção de filmes com a qualidade necessária para a produção de dispositivos com elevado desempenho. Neste sentido, métodos convencionais para a determinação de viscosidade, como o método de Stokes, se tornam de alto custo por demandarem o uso de volumes elevados dos materiais eletrônicos. Partindo deste problema, este estudo tem como objetivo a construção de um viscosímetro que empregue pequenas quantidades de material para determinação de sua viscosidade. Com este instrumento, a viscosidade do fluido é determinada por meio de medições da velocidade de escoamento do material quando comprimido entre duas placas de vidro. A resolução, precisão e exatidão de medições realizadas com este instrumento foram avaliadas a partir de ensaios feitos para a determinação da viscosidade do mel. Destes experimentos, verificou-se que o aparato experimental possui resolução de 23%, exatidão de 47% e precisão de 50% e de 27% com ajuste de capilaridade. Apesar da elevada incerteza das medições, que limitam a utilização do instrumento, foi demonstrada a possibilidade de realizar avaliações quantitativas de viscosidade por meio da compressão de um fluido entre placas paralelas.

Palavras-Chave: Viscosímetro, Instrumentos de Medida, Fluido.

Abstract

The ascension of the electronic press, which uses processed materials in liquid form, brings the need of control of the viscosity of the materials to obtain films with such quality that is needed to produce devices with a rich performance. That being said, usual methods to determine of the viscosity, such as Stokes method, turn out to be expensive for demanding too much use of electrical material. Starting from this, this study focus on creating a viscometer that gives small parts of a certain quantity of material to determine its viscosity. With this instrument, a viscosity of the fluid it's determined through the measurements of the speed when compressed in two plates of glass. The resolution, the precision and the accuracy of the measurements performed with this instrument were evaluated from trying made, for the determination of the viscosity of honey. From these experiments, it was determined that the experimental material has a resolution of 23%, precision of 50% and 27% with capillary adjustment and accuracy of 47%. Besides the high uncertainty of the measurements, that limits the use of the instruments, it shows the possibility of create quantitative avaliations of viscosity by compressing the fluid of parallel plates of glass.

Key-Words: Viscometer, Measuring instruments, Fluid.

Lista de símbolos

\vec{F} – Força tangencial que atua na placa

A – Área do fluido

σ – Tensão de cisalhamento

μ – Viscosidade

V_x – Velocidade no eixo x

d – Distância entre as placas

r – Raio

k – Constante do Viscosímetro de Stokes

φ – Densidade da esfera

ρ – Densidade do fluido

t – Tempo

h_b – Altura do ponto mais baixo do menisco

γ_{lv} – Tensão superficial do capilar líquido-vapor

θ – Ângulo de contato do capilar na parede

g – Aceleração gravitacional

S – Desvio padrão

α_f – Propagação da incerteza

P_c – Pressão capilar

Sumário

1. Introdução	9
2. Revisão Bibliográfica	10
2.1 Fluidos.....	10
2.2 Viscosidade.....	11
2.3 Viscosímetro de Stokes.....	12
3. Materiais e Métodos	13
3.1 Materiais para a montagem do aparato experimental.....	13
3.2 Amostras	14
3.3 Coleta e análise de dados.....	16
4. Resultados e Discussão	20
4.1 Viscosímetro.....	20
4.2 Modelagem	22
4.3 Análise de Dados	24
5. Conclusão	27
6. Referências	28

1. Introdução

No final do século XX, foram verificadas propriedades eletrônicas em materiais poliméricos (CHIANG,1977), os quais se comportam como semicondutores, apresentando alta condutividade elétrica quando dopado. Esta descoberta revelou que os polímeros conjugados, os que apresentam alternância entre as ligações duplas e simples entre os átomos de carbono da cadeia polimérica principal, apresentam estrutura eletrônica de um cristal unidimensional semicondutor. Assim, moléculas desta classe se tornaram candidatas para a produção de componentes eletrônicos. Somando isto à natureza desordenada dos materiais poliméricos, sua dissolução se torna possível e, desta forma, igualmente o processamento destes materiais semicondutores como tintas (soluções ou suspensões) por técnicas de impressão gráfica (HUANG, et al, 2010; LI, et al, 2012; SONDERGAARD, et al, 2013). Essas técnicas são de baixo custo de implantação, compatíveis com a produção em larga escala e, além disso, os dispositivos de eletrônica orgânica e impressa podem ser altamente flexíveis, ultrafinos, leves e transparentes. Estas características particulares possibilitam o surgimento de novas aplicações, como embalagens inteligentes e displays flexíveis (SIRRINGHAUS, et al,1998).

A possibilidade de processamento de componentes e circuitos eletrônicos utilizando técnicas de impressão gráfica, apresenta-se como uma vantagem tecnológica tão significativa que a eletrônica impressa encontra-se em plena ascensão científica e tecnológica. Porém, para o uso desta categoria de técnicas para a produção dos filmes eletrônicos de qualidade (KREBS, 2009), é preciso que as tintas eletrônicas sejam produzidas com viscosidade e tensão superficial controladas. Sendo assim, a determinação e o controle de viscosidade e tensão superficial são fatores importantes para o desenvolvimento da eletrônica impressa.

Em uma pesquisa realizada em nosso laboratório, estudou-se os conceitos básicos relacionados ao funcionamento de viscosímetros, mais especificamente o viscosímetro Stokes (Rossi, 2020). Este trabalho, apresentou a medição de viscosidade com uma incerteza de apenas 3,6%, porém também mostrou a necessidade de uma quantidade alta de solução (45 ml) para efetuar o experimento. Apesar do estudo ter demonstrado bons resultados na medida da viscosidade, a alta quantidade de solução necessária para a realização deste tipo de experimentação acarreta em altos custos.

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo a produção de um viscosímetro usando a compressão de um fluido entre duas placas de vidro com o objetivo de utilização de uma baixa quantidade de material para determinação de viscosidade.

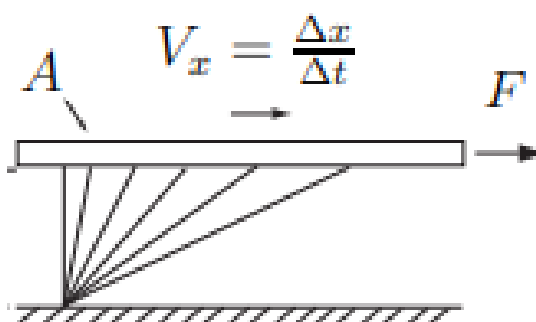
2. Revisão Bibliográfica

2.1 Fluidos

A categorização dos fluidos depende de uma grande quantidade de propriedades associadas ao comportamento desta classe de materiais, como, por exemplo, a descrições do meio contínuo, equações constitutivas, forças de superfície e densidade absoluta (GOBBI, et al, s.d.; COIMBRA, 2015). Pode-se definir um fluido como um material que se deformará continuamente ao ser submetido à ação de uma força tangencial, por menor que ela seja (GOMES, s.d.).

Para ilustrar melhor o comportamento dos fluidos, considera-se este material localizado entre uma placa horizontal móvel de área A e um plano paralelo em repouso. Em uma das extremidades da placa móvel é aplicada uma força tangencial \vec{F} que dá origem a tensão tangencial no fluido. A tensão tangencial pode ser descrita pelo quociente da força tangencial e a área da placa móvel (GOBBI, et al, s.d, BRUNETTI, 2008)

Figura 2.1 - Esquema de um fluido sobre uma tensão de cisalhamento



Fonte: (GOBBI, et al, s.d.)

A figura 2.1 ilustra um fluido que se deforma de maneira contínua durante a atuação de uma força sobre a placa móvel levando a um movimento laminar das camadas do fluido (GOBBI, et al, s.d.). A camada mais próxima à placa móvel tem uma velocidade igual à da placa, ou seja, não apresenta movimento relativo à placa.

A primeira camada se choca com a camada imediatamente abaixo, que por sua vez se desloca mais lentamente. Com isso, há uma transferência de quantidade de movimento molecular (ou viscoso) entre essas camadas do fluido, tendo como consequência a aceleração da camada mais lenta, enquanto estas retardam o movimento da camada mais rápida (COIMBRA, 2015). Sendo assim, as moléculas de camadas mais distantes da placa móvel sempre se deslocam com menor velocidade em relação às mais próximas à placa, oferecendo uma resistência ao movimento do material.

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 tensões de cisalhamento (MALISKA, 1988) e são representadas matematicamente pela equação (1):

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

2.2 Viscosidade

A viscosidade é uma das propriedades dos fluidos que influenciam o seu comportamento durante o escoamento, podendo ser interpretada como uma resistência ao movimento. Quanto mais viscoso for o fluido, maior será a dificuldade de o fluido escoar. Esta resistência pode depender de duas características dos fluidos: as forças de coesão e a quantidade de movimento molecular (COIMBRA, 2015). Para entendermos melhor a influência da viscosidade no escoamento, podemos retomar o uso do esquema apresentado na figura 2.1. Enquanto a placa estiver em movimento, é aplicado no fluido uma tensão de cisalhamento, fazendo com que o fluido escoe. Há uma proporcionalidade entre a tensão cisalhamento e a taxa de deformação (escoamento) deste fluido, sendo que o coeficiente de proporcionalidade entre estas grandezas é a viscosidade. Sendo assim, se a tensão de cisalhamento é descrita pela equação (1) e a deformação em um fluido Newtoniano é igual à taxa de variação da velocidade de escoamento (V_x) com a distância entre as placas (y) (VILANOVA, 2011), temos a relação escrita na equação (2)

$$\sigma = \mu \frac{dV_x}{dy}, \quad (2)$$

onde a viscosidade (μ) tem como unidade $\frac{Ns}{m^2}$ que é igual a *Pa. s*.

Neste trabalho serão discutidas as medidas de viscosidade em fluidos da dependência entre a viscosidade e a tensão de cisalhamento. A medida de viscosidade é necessária para diversas finalidades, como produções de engenharia, no uso de óleos de alta viscosidade em motores (SILVA,2017), ou na indústria farmacêutica onde xaropes consistem em preparações aquosas caracterizadas pela alta viscosidade (LOPES, et al., 2018).

2.3 Viscosímetro de Stokes

Para a determinação da viscosidade de fluidos são usados instrumentos chamados viscosímetros. Com o uso destes instrumentos, pode-se medir a viscosidade de forma direta ou indireta (FRANÇA, 2007). Em medidas diretas, são empregados instrumentos que medem de forma direta a tensão e a taxa de deformação do fluido. Já o outro grupo de viscosímetros pressupõe a razão entre a tensão aplicada e a taxa de deformação por meios indiretos, isto é, sem medir a tensão e deformação diretamente. Entre viscosímetros indiretos, temos o viscosímetro de Stokes, onde a viscosidade é determinada através de medições do tempo de queda de uma esfera através de um fluido.

Figura 2.2 - Viscosímetro de Stokes



Segundo França (2007, pg 229), para a medida em um viscosímetro de Stokes, são utilizado as seguintes variáveis: aceleração da gravidade, o diâmetro da esfera, a densidade da esfera, a densidade do fluido e a velocidade terminal de queda livre, isto é, a razão entre a distância L e o intervalo de tempo. Neste experimento uma esfera é submersa em um fluido em um tubo transparente vertical. Sobre ação da gravidade, deixa-se a esfera cair e com a medição do tempo de queda da esfera, é possível calcular a viscosidade absoluta (ROSSI, 2021), utilizando a relação apresentada na equação (3)

$$\mu = k(\varphi - \rho)t, \quad (3)$$

onde k é uma constante determinada empiricamente, φ é a densidade da esfera, ρ a densidade do fluido e t o tempo de queda da esfera.

O viscosímetro de Stokes, embora seja um instrumento de custo moderado e fácil construção, demanda um grande volume de fluido para a realização da experimentação. Partindo desta problemática, este estudo busca construir um viscosímetro de baixo custo que demande pequenas quantidades de material para realização da experimentação.

3. Materiais e Métodos

Para a determinação da viscosidade de fluidos, a pesquisa propõe a compressão de pequenas quantidades de materiais entre duas placas de vidro, através das quais a velocidade de escoamento pode ser determinada opticamente com o uso de câmeras fotográficas. Nesta seção serão descritos os materiais utilizados para a construção deste tipo de viscosímetro, bem como as metodologias para a coleta e para o tratamento dos dados experimentais.

3.1 Materiais para a montagem do aparato experimental

São poucos os materiais necessários para a construção do viscosímetro proposto. Para a construção do amparo que dará suporte às placas de vidro e ao celular, foi utilizada uma caixa de madeira usada para armazenar frutas. A caixa foi serrada e pregada, criando uma estrutura de dois níveis.

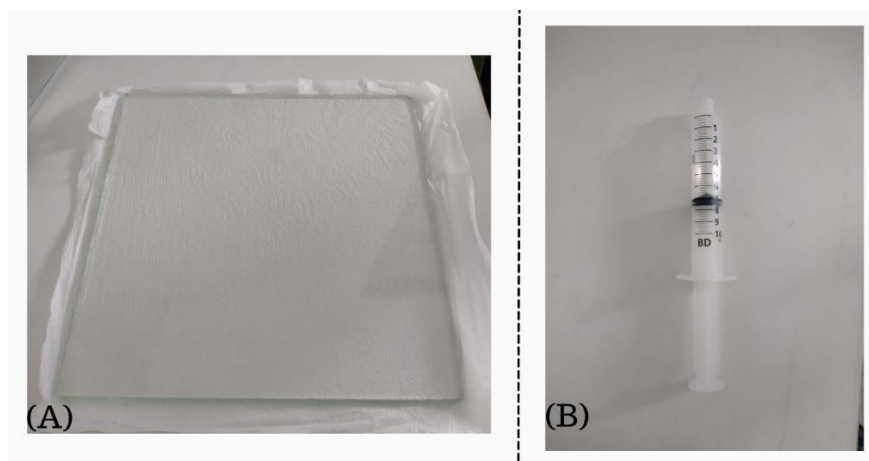
Figura 3.1- Base do viscosímetro



Fonte: Autor

Com a finalidade de ter um controle de volume de amostra, foi utilizado uma seringa de 10 ml . Para serem feitas as coletas de dados, foram usadas duas placas de vidro com a medida de 16 cm^2 e 187,70 g de massa, onde é depositado o mel e feita a compressão. E para a coleta de dados, é utilizada uma câmera de celular com uma captura de 30 fps.

Figura 3.2 - (A) Placa de vidro 16cm x 16 cm (B) Seringa de 10 ml



Fonte: Autor

3.2 Amostras

Nos ensaios feitos nesse trabalho foi utilizado o mel da marca Karo, escolhido arbitrariamente dentre os disponíveis no mercado. Deste mel, foi determinada sua densidade e tensão superficial.

A densidade do mel, é calculada com a razão da massa e volume do mel. Para a medida da massa, foi usada a balança *TL-series – Professional Digital Mini* com

capacidade de 50 g e sensibilidade de 0,001g. Para o volume foi utilizada a seringa para coletar 1 ml de mel, tendo assim a densidade de $1,3 \pm 0,2 \text{ g/cm}^3$.

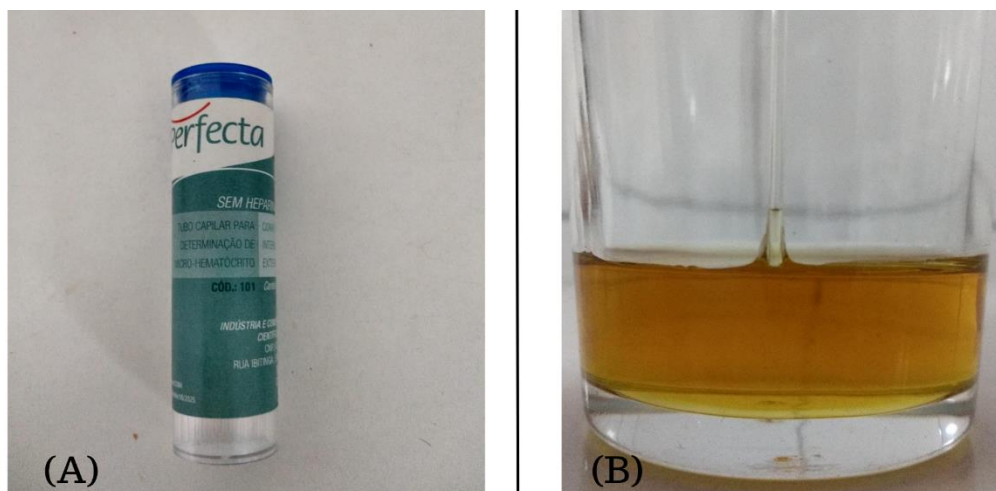
Figura 3.2 - Balança TL series



Fonte: Autor

A determinação de tensão superficial foi feita a partir da medida de capilaridade. Para isso, foi usado um tubo capilar de comprimento de 75mm, diâmetro interno de 1mm e externo de 1,5mm. O tubo foi preso a um copo e submerso no mesmo mel usado nos ensaios.

Figura 3.3 - (A) Tubo capilar (B) Experimento de capilaridade



Fonte: Autor

Como explica Gomes (s.d., pg 8), tubos com pequeno diâmetro, os chamados tubos capilares, quando imersos em um fluido, têm sua superfície em formato esférico e é denominada menisco. Quando ocorre esta depressão ou elevação capilar, ocorre a capilaridade. Com o efeito da capilaridade, o fluido pode subir ou descer ao longo

do tubo, onde essa diferença de altura está relacionada no modelo matemático mostrado na equação (4) (BULLARD, GARBOCZI, 2009)

$$h_b = \frac{4\gamma_{lv}\cos\theta}{\Delta\rho g D}, \quad (4)$$

onde h_b é a altura do ponto mais baixo do menisco acima da superfície do reservatório de líquido, γ_{lv} é a tensão superficial do menisco líquido-vapor, θ é o ângulo de contato do menisco na parede, $\Delta\rho$ é a diferença de densidade entre o líquido e o vapor acima do capilar, g é a aceleração gravitacional e D é o diâmetro. Isolando $\gamma_{lv}\cos\theta$, obtemos o valor de $0,0135 \text{ N/m}$.

Considerando 2 placas paralelas, separadas por uma distância d (BULLARD, GARBOCZI, 2009), temos a equação (5)

$$h_b = \frac{2\gamma_{lv}\cos\theta}{\Delta\rho g d}. \quad (5)$$

A partir desta relação, pode-se determinar a dependência da pressão de capilaridade com a distância entre as placas, conforme apresentado na equação (6)

$$P_c = \frac{2\gamma_{lv}\cos\theta}{d} = \frac{0,027}{d}. \quad (6)$$

3.3 Coleta e análise de dados

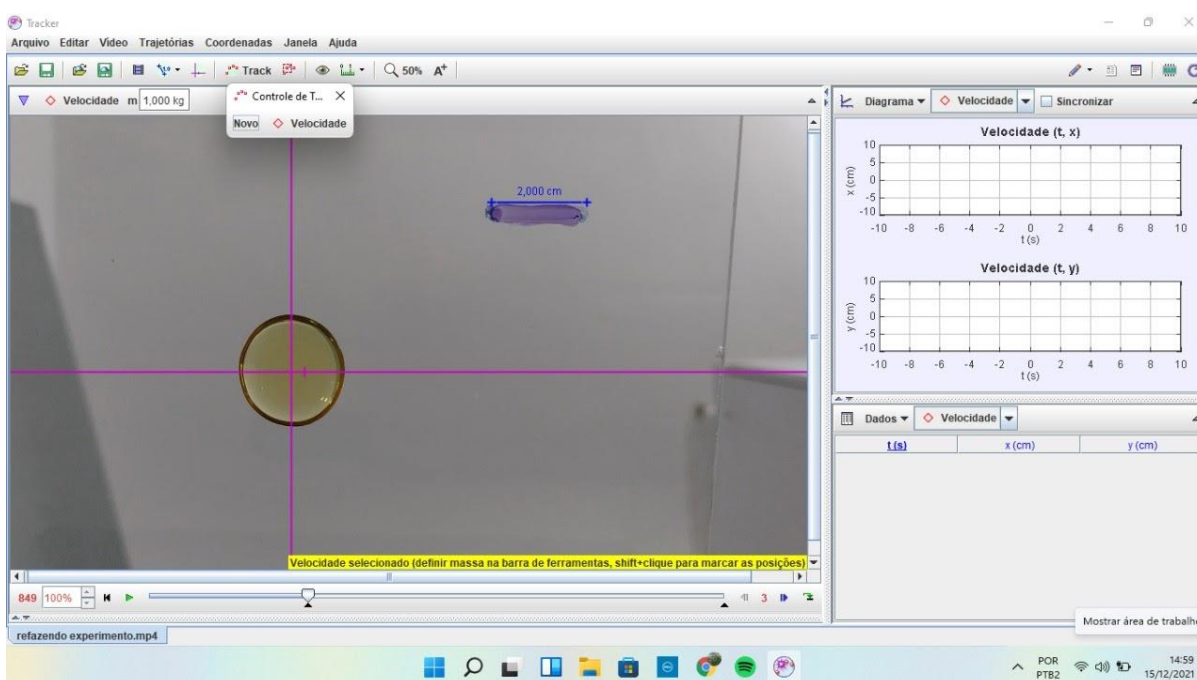
Para este experimento, é utilizado 1 ml de mel, que é coletado usando uma seringa de 10 ml. O mel coletado será colocado centralizado sobre uma placa de vidro fixa no amparo. Ao se colocar a segunda placa sobre o mel, a placa móvel, a filmagem irá capturar o escoamento radial do mel durante 4 minutos, para que possamos obter uma coleta suficiente para a medida de viscosidade. Foram feitos seis ensaios para medir a viscosidade do mel puro e seis para medir a viscosidade com o mesmo mel diluído em 10% de água. A proporção da solução de mel e água foi estabelecida em termos do percentual em massa total dos fluidos. Por exemplo, se coletado 9 ml de mel que representa 90% da solução, foi adicionado 1 ml de água para compor os 10% de mel.

A caracterização de imagens experimentais foi feita com as ferramentas proporcionadas pelo software *Tracker* na sua versão 6.0.3. Esse programa é usado

para análise de vídeo em estudos de movimento e atualmente vem sendo estudado por conta de seu potencial no uso de ensino de física (NUNES, 2020).

Para análise, foi feita uma calibração de escala do vídeo e centralizou-se o eixo de coordenadas no fluído. Para calibrar a escala é preciso que se saiba as medidas de algum objeto que aparece no vídeo, portanto foi feito uma linha de 2 cm na placa de vidro. Com isso, usa-se a ferramenta “bastão de medição” para o ajuste da escala, como pode ser visto na figura 3.4, em azul. Assim, todas as medidas realizadas no Tracker, serão feitas com referência na escala de calibração.

Figura 3.4 - Layout do software Tracker com o bastão de medição e o eixo de coordenadas.



Fonte: Autor

Para as medidas serem feitas, foi centralizado o eixo de coordenadas no centro do fluído. Afim de marcar a variação do raio é utilizado a ferramenta de controle de trajetória, conforme se verifica na figura 3.4, em rosa. Os dados foram obtidos utilizando a ferramenta de coleta manual, a cada 230 quadros.

Ao terminar a marcação, o software disponibiliza uma tabela com os seguintes dados: tempo (t) em segundos, o raio (x) em centímetros e a velocidade no eixo x (V_x) em centímetros por segundo. Com esta coleta manual, obtemos e calculamos as variáveis necessárias para a medida da viscosidade, de acordo com a modelagem da seção 4.2.

Quando trabalhamos com um resultado de uma medida de uma grandeza física a partir de um instrumento, é necessário determinar a incerteza experimental. Existem

características de medidas que justificam o estudo de incertezas para indicar de forma quantitativa a qualidade de dados, como condições ambientais, características dos instrumentos ou erros humanos (CABRAL, 2004). Esta abordagem é indispensável para este estudo já que se propõe como principal resultado a construção de um instrumento de medida. Neste caso, há necessidade da determinação da resolução do instrumento, bem como da precisão e exatidão das medições. Segundo Silva (pg 4, 2006), podemos definir esses fundamentos como:

- Resolução: Algumas vezes chamada de “capacidade de leitura”, é basicamente uma medida do menor incremento mensurável.
- Precisão: É a medida da concordância entre determinações repetidas de uma mesma grandeza. A precisão é usualmente quantificada como o desvio padrão de uma série de medidas.
- Exatidão: A exatidão de uma medida (ou da média de um conjunto de medidas) é a distância entre a medida e um valor tomado como referência.

Uma vez que o instrumento aqui proposto permite a determinação da viscosidade de um material a partir de medições indiretas, isto é, a partir de medições de velocidade de escoamento de um fluido, para a determinação da resolução do instrumento realizamos a propagação da incerteza oriunda da resolução dos instrumentos de medida direta, conforme a equação (7). A propagação de incerteza (α_f), pode ser calculado em função de N grandezas e combinados (IF-USP,2019), como mostra a equação:

$$\alpha_f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \alpha_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_N} \alpha_N\right)^2}. \quad (7)$$

Portanto, é necessário um cálculo que caracterize a qualidade dos dados de uma medida. Ou seja, expressar sua incerteza (GALLAS, s.d.).

A precisão dos conjuntos de medições foi determinada por meio do desvio padrão dos conjuntos de dados. Para determinar o desvio padrão (S) de um número finito de dados (CABRAL, 2004), foi utilizada a equação (8):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}. \quad (8)$$

onde \bar{x} é a média aritmética dos dados e n o número de dados.

A precisão foi determinada em dois contextos distintos que, por simplicidade, chamaremos de Contexto 1 e Contexto 2. O Contexto 1 trata de um conjunto de medidas de viscosidade obtido durante uma única medida. Uma vez que a viscosidade do fluido é independente da velocidade de escoamento, durante uma medição se obtém uma sequência de valores de viscosidade em função do tempo de experimentação. Deste conjunto de dados, determinamos a precisão que chamaremos de Pc1. O Contexto 2 trata de um conjunto de dados obtidos a partir de valores médios determinados por diferentes medições. Em outras palavras, é um conjunto de dados obtidos por diferentes medições realizadas no Contexto 1. A precisão obtida neste contexto será chamada de Pc2.

A exatidão da experimentação foi determinada com referência em valores de viscosidade obtidos pelo método de Stokes e segundo a relação matemática da equação (3).

Para a medição da viscosidade de referência, foi utilizado um viscosímetro de Stokes comercial, modelo “*Falling Ball Viscosimeter C*”, onde as medições de tempo foram feitas com um cronômetro. Com este aparato experimental, a incerteza na medição de tempo foi ± 1 s, a densidade da esfera (Metal menor 1) foi de $7,9 \pm 0,2$ g/cm^3 e a densidade do mel foi determinada anteriormente como descrito na seção 3.2.

Com este instrumento foram obtidos os valores apresentados na tabela 1, onde a viscosidade do mel foi determinada como 34 ± 6 Pa.s.

Solução	Viscosidade Média (Pa.s)	Resolução da medida
#1	34	± 6
#2	34	± 6
#3	33	± 6
Média	34	± 6

Tabela 1: Medidas e média de viscosidade do mel puro com o viscosímetro de Stokes e suas incertezas.

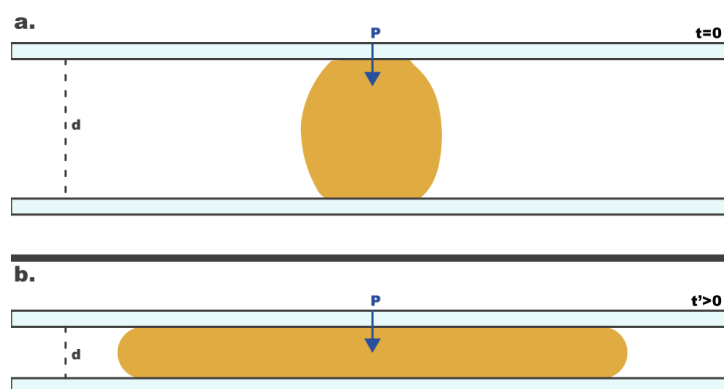
4. Resultados e Discussão

Nesta seção será apresentado o viscosímetro construído e a sua forma de funcionamento (seção.4.1), a modelagem feita para o cálculo da viscosidade a partir da equação que descreve a tensão de cisalhamento (seção 4.2) e os resultados das medidas com o viscosímetro construído (seção 4.3).

4.1 Viscosímetro

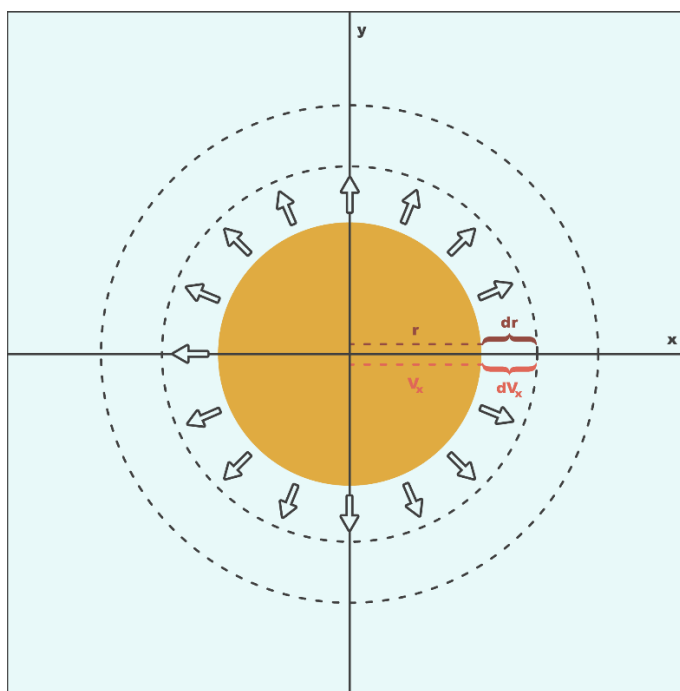
Nosso foco de trabalho foi construir um instrumento para medir a viscosidade de um fluido por meio de sua compressão entre duas placas de vidro. Neste sistema, a placa de vidro inferior foi fixada em uma base, enquanto a placa de vidro superior possui a liberdade de movimentação vertical. Sendo assim, neste aparato experimental, o fluido é comprimido pela força de atração gravitacional da placa de vidro móvel (1,83 N). Conforme ilustrado nas figuras 4.1, por meio da ação da força peso da placa móvel sobre o fluido, ocorre o escoamento, cuja velocidade pode ser medida empregando-se um aparato de coleta e análise de imagens.

Figura 4.1 - Visão de um corte lateral do viscosímetro (a) em um pequeno intervalo de tempo e (2) em um tempo maior que zero



Fonte: Autor

Figura 4.2 - Visão superior do viscosímetro e sua forma de escoamento.



Fonte: Autor

A figura 4.2 ilustra uma visão superior ou inferior do aparato experimental, indicando a possibilidade de determinação do raio do disco em função do tempo, onde $r(t)$ é medido experimentalmente. A partir desta medida pode-se determinar a pressão no fluido devido à compressão, $P(t)$, assim como a velocidade de escoamento, $V(t)$, conforme descrito na equação 9 e 10.

$$P(t) = \frac{ma}{A} = \frac{mg}{2\pi r^2}, \quad (9)$$

$$V(t) = \frac{dr(t)}{dt}. \quad (10)$$

A partir destes valores, pode-se modelar o sistema descrito na seção 4.2, estabelecendo uma relação entre tensão de cisalhamento e velocidade de escoamento, a qual permite a determinação indireta da viscosidade do fluido.

Partindo deste método de operação, foi construído um aparato experimental constituído por uma base, uma placa de vidro fixa, uma placa de vidro móvel e uma câmara fotográfica. A base foi construída de forma que fosse possível posicionar as placas de vidro e, ainda assim, fazer as filmagens, como pode ser observado na figura 4.3.

Figura 4.3 - Viscosímetro pronto.



Fonte: Autor

No local onde é posicionado o vidro foi colocado uma moldura para limitar o movimento do vidro apenas na vertical. Esta moldura foi feita com uma madeira com acabamento em fórmica, para a redução do atrito entre a placa de vidro móvel e as guias.

Para fazer a medida, um celular foi posicionado sob a placa de vidro inferior (figura 4.3) e utilizado como câmera para a gravação. Em seguida, o fluido foi despejado cuidadosamente no centro da placa fixa, a obter uma deposição em forma de circunferência. Após o início da gravação do vídeo, a placa de vidro móvel foi cuidadosamente liberada sobre o fluído, dando início a coleta de dados. A coleta de dados foi realizada, em média, durante 4 minutos. Após a coleta de dados, a velocidade de escoamento e o raio do disco foram obtidos utilizando o software Tracker 6.0.3, como descrito na seção 3.3.

4.2 Modelagem

A modelagem para o cálculo da viscosidade se iniciou a partir da equação geral tensão de cisalhamento, equação (2), que pode ser reescrita de forma conveniente, conforme o apresentado na equação (11)

$$F = \mu A \frac{dV_x}{dz}, \quad (11)$$

onde F representa a magnitude da tensão de cisalhamento, A é a área da circunferência, μ representa a viscosidade, V_x a velocidade de escoamento e, por fim, dz é a variação no eixo z . Podemos fazer as seguintes considerações:

1. A velocidade de escoamento da camada de um fluido em contato com as placas de vidro foi considerada nula.
2. A tensão de cisalhamento atua apenas na camada posicionada na altura média entre as placas (figura 4.1) e tem magnitude dada pelo produto entre a pressão do fluido ($= mg/\pi r^2$) e a área de uma casca cilíndrica ($2\pi r d$) adotada como face livre do fluido, conforme a equação (12)

$$F = \frac{mg}{\pi r^2} 2\pi r d, \quad (12)$$

onde m é a massa da placa de vidro móvel, g é a aceleração da gravidade, r é o raio da amostra e d a distância entre as placas de vidro.

3. A magnitude da velocidade de escoamento decresce linearmente a partir da camada posicionada na altura média entre as placas, onde a velocidade de escoamento nesta camada é obtida por meio de experimentação. Deste modo, a taxa de variação da velocidade de escoamento com a altura pode ser representada matematicamente conforme a equação (13)

$$\frac{d}{dz} V = \frac{V_x}{d/2} = \frac{2V_x}{d}. \quad (13)$$

A partir destas considerações, a equação 9 pode ser reescrita como:

$$\frac{mg}{\pi r^2} 2\pi r d = \mu \pi r^2 \frac{2V_x}{d}. \quad (14)$$

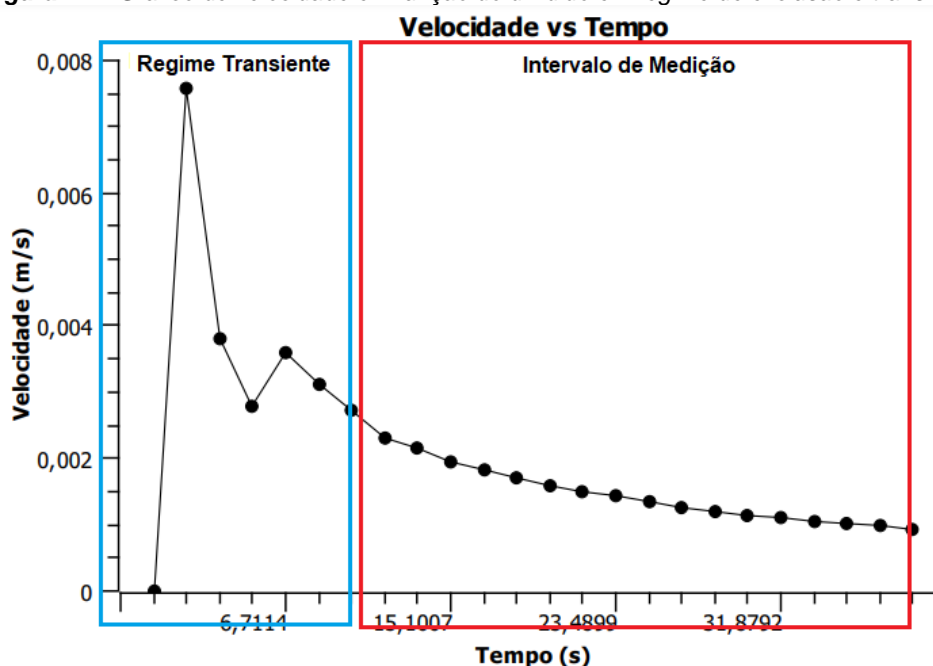
Desta relação, é possível determinar a viscosidade do fluido por meio de medições de velocidade de escoamento e do raio do disco do fluido, como apresentado na equação (15)

$$\mu = \frac{mgd^2}{V_x \pi r^3}. \quad (15)$$

4.3 Análise de Dados

A figura 4.4 apresenta uma curva representativa da velocidade de escoamento em função do tempo, obtida experimentalmente. Nesta figura é possível observar que, nos instantes iniciais, a velocidade de escoamento apresenta um crescimento abrupto relacionado ao processo de liberação da placa de vidro.

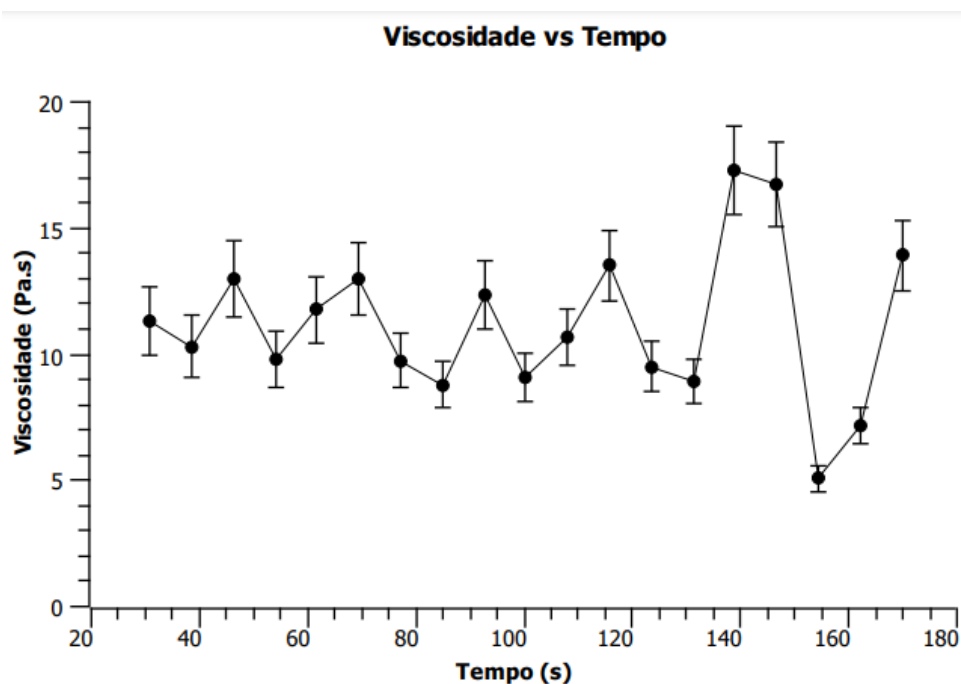
Figura 4.4 - Gráfico de velocidade em função do dividido em regime de exclusão e transiente



Durante o regime transiente, o sistema ainda não se encontra em equilíbrio, resultando em medidas inadequadas. Por conta disso, este período foi desconsiderado na determinação da viscosidade do fluido.

A figura 4.5 apresenta resultados da viscosidade obtida a partir de medições indiretas, empregando-se a equação (15). Este resultado demonstra que no regime de medição a viscosidade do fluido foi obtida com valores praticamente constantes. Na figura, as incertezas (resolução do instrumento) foram determinadas a partir da incerteza na determinação da massa da placa móvel ($\pm 0,001$ g), da medição do raio do disco do fluido e da velocidade de escoamento empregando a equação (10).

Figura 4.5 - Gráfico de viscosidade em função do tempo



A tabela 2 apresenta o valor médio da viscosidade, a precisão (Pc1) e a resolução para seis medições. Deste conjunto de medições foi possível determinar um valor médio de viscosidade como 15 Pa.s e a precisão Pc2 como ± 6 (40%).

Solução	Viscosidade Média (Pa.s)	Pc1	Resolução
#1	20	± 9 (45,0%)	± 3 (15,0%)
#2	11	± 5 (45,5%)	± 2 (18,2%)
#3	12	± 6 (50,0%)	± 2 (16,7%)
#4	13	± 6 (46,1%)	± 3 (23,1%)
#5	23	± 9 (39,1%)	± 4 (17,4%)
#6	11	± 3 (27,3%)	± 2 (18,2%)

Tabela 2: Médias de viscosidade do mel puro com o viscosímetro construído e suas incertezas.

Na tabela 2 pode-se determinar que a resolução do instrumento foi inferior a 24%, enquanto que a precisão Pc1 foi inferior a 50%. Deste modo, se verifica que a maior incerteza durante uma medição se deve a baixa precisão do instrumento. Por outro lado, Pc2 apresenta valores inferiores a 40%, os quais também superam os

valores apresentados pela resolução do instrumento. Esse resultado confirma que a maior incerteza na experimentação aqui proposta decorre de erros aleatórios realizados durante as medições, que em medições sucessivas se manifestam como um elevado desvio padrão. Deste modo, a viscosidade do mel obtida com o instrumento aqui proposto foi de 15 ± 6 Pa.s.

Este valor em relação ao valor obtido pelo método de Stokes (34 ± 6 Pa.s) indica exatidão de 56%. Como a exatidão de medição aqui proposta pode ser impactada pelo efeito de capilaridade, propusemos uma correção de modelagem, adicionando a pressão de capilaridade, P_c , à pressão do sistema, apresentando a equação (16)

$$\left(\frac{mg}{\pi r^2} + P_c\right) 2\pi r d = \mu \pi r^2 \frac{2V_x}{d}. \quad (16)$$

Com essa correção, a viscosidade é determinada conforme apresentado na equação (17)

$$\mu = \left(\frac{mg}{\pi r^2} + P_c\right) \frac{d^2}{V_x r}. \quad (17)$$

A partir desta correção, a viscosidade do fluido foi determinada como 18 ± 5 Pa.s. Embora o efeito de capilaridade seja considerável (~20%), este efeito ainda é muito inferior à incerteza gerada pelos erros aleatórios e resulta em uma exatidão de 47%. Em linhas gerais, a análise das incertezas nas medidas com o aparato proposto está associada principalmente a erros aleatórios, apesar da correção de capilaridade ter gerado uma melhor precisão (27%), ainda que com baixa exatidão (47%) mesmo realizando correções que envolvem o efeito de capilaridade do sistema.

Contudo, este aparato experimental pode ser utilizado para análises qualitativas e permite a comparação da viscosidade de fluidos. Para ilustrar essa possibilidade, realizamos medições da viscosidade de uma solução de mel em água com concentração em massa de 90% de mel. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 3 e a viscosidade obtida foi 2 ± 2 Pa.s (100%), o qual também apresenta um valor próximo ao obtido anteriormente para soluções de mel com esta concentração (ROSSI, 2020).

Solução	Viscosidade Média (Pa.s)	Desvio Padrão	Resolução da Medida
---------	--------------------------	---------------	---------------------

#1	2	± 1 (50%)	± 1 (50%)
#2	4	± 1 (25%)	± 1 (25%)
#3	2	± 1 (50%)	± 1 (50%)
#4	1	± 1 (100%)	± 1 (100%)
#5	1	± 1 (100%)	± 1 (100%)
#6	4	± 2 (50%)	± 1 (25%)

Tabela 3: Médias de viscosidade do mel diluído em 10% de água com o viscosímetro e suas incertezas.

5. Conclusão

O objetivo principal deste estudo foi a construção de um viscosímetro no qual se utilize quantidades de fluido inferiores (1 ml) às empregadas em um viscosímetro de Stokes (45 ml). Para tanto, construímos um viscosímetro no qual o fluido é caracterizado por meio da determinação da velocidade de escoamento do fluido enquanto comprimido entre duas placas de vidro. Neste aparato a velocidade de escoamento foi determinada empregando-se uma câmera fotográfica e o software de análise de imagens Tracker 6.0.3. Para a determinação indireta da viscosidade dos fluidos, foi realizada uma modelagem matemática considerando-se como aproximação uma tensão de cisalhamento, que atua na camada de fluido posicionada na região média entre as placas, com magnitude proporcional à pressão, devido à compressão do fluido. Como segunda aproximação, considerou-se que a velocidade de escoamento do fluido decai linearmente para zero a partir da região em que a tensão de cisalhamento atua.

Com este aparato realizamos medições de viscosidade do mel, cuja viscosidade determinada pelo método de Stokes foi de 34 ± 6 Pa.s. Com nosso aparato experimental, essa viscosidade foi determinada como 15 ± 6 Pa.s e 18 ± 5 Pa.s para, respectivamente, a análise de dados sem e com correções pelo efeito de capilaridade. Este resultado demonstra que o aparato experimental proposto permite a realização de medição com baixa exatidão, com desvios superiores a 47% em relação ao valor obtido com o viscosímetro de Stokes comercial. Adicionalmente, determinamos a resolução do viscosímetro como 23%. A precisão obtida foi de 50%

para um dos conjuntos de medição. Com a correção de capilaridade, entretanto, foi para 27%. A taxa de incerteza obtida é superior às demais, o que indica que a principal fonte de incerteza nas medições decorre de erros aleatórios durante o experimento. Estes resultados indicam que o aparato experimental proposto permite a determinação quantitativa de viscosidades com elevada incerteza experimental.

Contudo, realizamos medições da viscosidade de uma solução de mel contendo 10% de água, a qual apresentou a viscosidade de 2 ± 2 Pa.s, este resultado indica que, embora o aparato proposto seja limitado para a determinação quantitativa de viscosidade, o mesmo pode ser empregado para avaliações qualitativas e comparativas da viscosidade de fluidos.

6. Referências

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**, 2 ed., 2018

BULLARD, J. W; GARBOCZI, E. J. **Capillary rise between planar surfaces**, Materials and Construction Research Division, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, USA, Physical Review, 2009.

CABRAL, P. **Erro e incertezas de medição**, Instituto de Engenharia do Porto – Departamento de Física, 2004.

CHIANG, C. et al. **Electrical-conductivity in doped polyacetylene**. Physical Review Letters, v.19, n. 8, p. 4140–4148, 1977.

COIMBRA, L. **Mecânica dos Fluidos**, E-papers, Rio de Janeiro 2015

FRANÇA, F. A. **Instrumentação e Medidas: grandezas mecânicas**, UNICAMP, Campinas, 2007.

GALLAS, Márcia R. **Incerteza de Medição**, IF-UFRGS, Rio Grande do Sul.

GOBBI, Maurício; DIAS, Luís Nelson; MASCARENHAS, Flavio; VALENTINE, Enise. **Introdução à Mecânica dos Fluidos e aos Fenômenos de Transporte**

GOMES, M. H. R. **Apostila de mecânica dos fluidos**, Universidade Federal de Juiz de Fora, Depto Engenharia Sanitária e Ambiental.

HUANG, D. C. 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.

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.

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.

LOPES, A. C., MORAES, A. D., OLIVEIRA, A. F. R. de, GUIMARÃES, B. P., OLIVEIRA, C. F. de, BETIM, F. C. M., BOBEK, V. B. **Estudo físico-químico de xarope broncodilatador adulto**, Centro de Ensino Superior dos Campos Gerais (CESCAGE), Ponta Grossa, Paraná, 2018.

MALISKA, A. M. **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.

NUNES, E.T. **As potencialidades da experimentação através da videoanálise para o ensino de física no ensino médio por meio do software Tracker**, Universidade Federal de Alagoas, Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ensino de Ciências e Matemática, Maceió 2020.

Propagação de incerteza, Caíke Crepaldi. Disponível em <<http://fap.if.usp.br/~crepaldi/posts/experimental%20physics/propagacao-de-incertezas.html>> Acesso em: 15 jan. 2022

ROSSI, M. **Estudo e instrumentação para medidas de viscosidade**, Orientador: Dr. Giovani Gozzi, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Graduação em Física, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro - SP.

SILVA, H. D. **Precisão, Exatidão, e a Terminologia das Medições**, UNESP-Bauru 2006, Adaptado de: V. Thomsen. "Precision and The Terminology of Measurement". The Physics Teacher, Vol. 35, pp.15-17, Jan. 1997.

SILVA, T. P. **Determinação experimental da viscosidade através do método de Stokes**, Orientador: Glauco Demóclito Tavares de Barros – Trabalho de iniciação científica, IFCE Departamento de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação, Juazeiro do Norte, Ceará, 2017

SIRRINGHAUS, H.; TESSLER, N; FRIEND, R. H. **Integrated Optoelectronic Devices Based on Conjugated Polymers**, SCIENCE, v. 280, p. 1741-1744, 1998.

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.

VILANOVA, L. C. **Mecânica dos Fluidos**, 3. ed., Santa Maria, RS: Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, Curso em Automação Industrial, 2011.