

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Marcelo Juncken Rodrigues

**Desenvolvimento de um sistema de medição de
viscosidade em uma roda giratória**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Igor Braga de Paula

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à minha família pelo total suporte e incentivo ao curso escolhido.

Ao meu orientador, pela paciência, apoio e pelo conhecimento que me foi passado durante a elaboração deste projeto.

À PUC-Rio e ao Laboratório de Engenharia dos Fluidos, pelo ambiente amigável proporcionado.

Aos meus amigos, pelo auxílio durante meus estudos e por me proporcionarem momentos bons.

RESUMO

Desenvolvimento de um sistema de medição de viscosidade

Viscosidade é uma propriedade de suma importância para o estudo do escoamento de fluidos, sendo responsável por perdas de energia decorrentes do transporte de fluidos em dutos e tubulações. Na produção de petróleo, é comum a coexistência de diferentes fluidos na tubulação. Nesse caso, os fluidos podem se arranjar de diferentes maneiras na tubulação e podem também formar emulsões. A viscosidade de emulsões pode ser maior do que a de cada fase separadamente. Para o projeto e operação de dutos é necessário o conhecimento da viscosidade efetiva de emulsões em condições realísticas de operação. De acordo com Johnsen, Førdedal e Urdahl (1996), um aparato do tipo roda girante é especialmente interessante para medição de viscosidade de emulsões. Nesse caso o fluido não passa por unidades de bombeamento, o que poderia alterar as características das emulsões e causar quebra de polímeros no caso de estudo de redutores de atrito. No presente trabalho buscou-se adaptar um aparato do tipo roda girante, para a medição de viscosidade. A roda é composta por um aro envolto por uma tubulação por onde escoo o fluido. A montagem proposta também inclui sensores para a medição de velocidade, um motor elétrico para movimentar a roda e uma placa de aquisição de dados e controle da potência elétrica fornecida ao motor. Além disso, implementou-se um controlador PID para ajuste da velocidade de giro da roda. Foram realizados experimentos para caracterização do dispositivo em vazio, para a medição do torque necessário para a movimentação do aparato. Depois, foram realizadas com a tubulação parcialmente preenchida com diferentes fluidos. A viscosidade desses fluidos foi caracterizada com um viscosímetro padrão e os dados foram utilizados para calibrar o equipamento. A partir da calibração foram realizadas medições de viscosidades de misturas de água e glicerina e os resultados mostraram que, na faixa estudada, a metodologia permite a medição da viscosidade de fluidos Newtonianos dentro de uma margem de erro menor do que 10%.

Palavras-Chave: Viscosidade, torque, velocidade, fluido de trabalho, ar, água filtrada e glicerina.

ABSTRACT

Viscosity is a very important property when it comes to fluid flow because it is responsible for the energy losses associated with the transport of fluids in ducts and pipes. In the production of oils, it is common the coexistence of different fluids in the pipe. In that case, the fluids may be arranged in different ways in the tubing and may also form emulsions. The viscosity of emulsions may be higher than that of each step separately. For the design and operation of pipelines it is necessary to know the effective viscosity of emulsions under realistic operating conditions. According to Johnsen, Førdedal and Urdahl (1996), a rotating wheel type apparatus is especially interesting for viscosity measurement of emulsions. In this case the fluid does not pass through pumping units, which could alter the characteristics of the emulsions and cause breakage of polymers in the case of study of friction reducers. In the present work we tried to adapt a rotating wheel-type apparatus for the measurement of viscosity. The wheel is composed of a rim wrapped by a pipe through which the fluid flows. The proposed assembly also includes sensors for speed measurement, an electric motor to move the wheel and a data acquisition board and control of the electrical power supplied to the motor. In addition, a PID controller was implemented to adjust the wheel speed. Experiments were carried out to characterize the no-load device to measure the torque required to move the device. They were then performed with the tubing partially filled with different fluids. The viscosity of these fluids was characterized with a standard viscometer and the data was used to calibrate the equipment. From the calibration, viscosity measurements of water and glycerine mixtures were performed and the results showed that, in the studied range, the methodology allows the measurement of the viscosity of Newtonian fluids within a margin of error of less than 10%.

Key-words: Viscosity, torque, speed, working fluid, air, filtered water and glycerin.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. CONTEXTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
2.1. DEFINIÇÃO DE VISCOSIDADE	3
2.2. FATORES QUE ALTERAM A VISCOSIDADE	5
2.3. ESCOAMENTOS TURBULENTOS DESENVOLVIDOS EM TUBOS	6
3 METODOLOGIA	7
3.1. COMPONENTES DA ANÁLISE EXPERIMENTAL	7
3.1.1. ARO	7
3.1.2. TUBULAÇÃO	8
3.1.3. SENSOR INFRAVERMELHO	8
3.1.4. ENGRENAGEM	9
3.1.5. ESTRUTURA DE FIXAÇÃO	10
3.1.6. MOTOR ELÉTRICO	10
3.1.7. ARDUINO	11
3.2. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	14
3.3. DESCRIÇÃO DAS CONDIÇÕES DE FLUXO	17
4 RESULTADOS	22
4.1. CALIBRAÇÃO DA CURVA DE LOG(F) X LOG (RE)	22
4.2. MEDIÇÃO DE VISCOSIDADE UTILIZANDO A RODA GIRATÓRIA	23
4.3. DADOS OBTIDOS	24
4.4. GRÁFICOS	28
5 CONCLUSÕES	30
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

Lista de figuras

FIGURA 2-1: MOVIMENTO RELATIVO DAS PARTÍCULAS DO FLUIDO NA PRESENÇA DE TENSÃO DE CISALHAMENTO.	4
FIGURA 2-2: MOVIMENTO RELATIVO DAS PARTÍCULAS DO FLUIDO NA PRESENÇA DE TENSÃO DE CISALHAMENTO.	4
FIGURA 3-1: ARO.	8
FIGURA 3-2: TUBULAÇÃO.	8
FIGURA 3-3: SENSOR PHOTOGATE.	9
FIGURA 3-4: ENGRENAGEM DESENHADA EM SOLIDWORKS.	9
FIGURA 3-5: ESTRUTURA DE FIXAÇÃO.	10
FIGURA 3-6: MOTOR ELÉTRICO ACOPLADO AO SISTEMA. FIGURA 3-7: FONTE DO MOTOR ELÉTRICO.	11
FIGURA 3-8: PLACA DE ARDUÍNO.	11
FIGURA 3-9: REPRESENTAÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO LABVIEW.	12
FIGURA 3-10: DIAGRAMA DE BLOCOS DO LABVIEW.	13
FIGURA 3-11: MONTAGEM DO EXPERIMENTO.	14
FIGURA 3-12: SENSOR ACOPLADO AO EIXO E À ENGRENAGEM.	15
FIGURA 3-13: REPRESENTAÇÃO DO MOVIMENTO GIRATÓRIO DA TUBULAÇÃO.	16
FIGURA 3-14: DEMONSTRAÇÃO DA MONTAGEM.	17
FIGURA 3-15: CURVA MOSTRANDO TORQUE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE PARA UM SISTEMA.	18
FIGURA 3-16: VALOR DE LL ENCONTRADO PELO SOLIDWORKS.	19
FIGURA 3-17: SERINGA UTILIZADA NO EXPERIMENTO.	20
FIGURA 3-18: MEDIÇÃO DA MASSA DO FLUIDO.	20
FIGURA 3-19: VISCOSÍMETRO UTILIZADO.	21
FIGURA 4-1: CURVA DE CALIBRAÇÃO.	22
FIGURA 4-2: GRÁFICO DO TORQUE EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE PARA CADA SOLUÇÃO UTILIZADA.	28
FIGURA 4-3: MARGEM DE ERRO DA VISCOSIDADE.	29

Lista de tabelas

TABELA 4-1: DADOS USADOS PARA O CALCULO DA VISCOSIDADE DADA PELA RODA PARA A SOLUÇÃO DE 2.5% DE GLICERINA.	23
TABELA 4-2: DADOS USADOS PARA O CÁLCULO DA VISCOSIDADE DADA PELA RODA PARA A SOLUÇÃO DE 7.5% DE GLICERINA.	23
TABELA 4-3: DADOS OBTIDOS PELO LABVIEW.	24
TABELA 4-4: DADOS OBTIDOS DO AR.	25
TABELA 4-5: DADOS OBTIDOS DA ÁGUA FILTRADA.	25
TABELA 4-6: DADOS OBTIDOS DA SOLUÇÃO COM 2.5% DE GLICERINA.....	26
TABELA 4-7: DADOS OBTIDOS DA SOLUÇÃO COM 5.0% DE GLICERINA.....	26
TABELA 4-8: DADOS OBTIDOS DA SOLUÇÃO COM 7.5% DE GLICERINA.....	27
TABELA 4-10: DADOS OBTIDOS DA SOLUÇÃO COM 12.5% DE GLICERINA.....	27

1 INTRODUÇÃO

1.1.Contexto

Viscosidade é uma propriedade de suma importância para o estudo do escoamento de fluidos, sendo responsável por perdas de energia decorrentes do transporte de fluidos em dutos e tubulações. Na produção de petróleo, é comum a coexistência de diferentes fluidos na tubulação. Nesse caso, os fluidos podem se arranjar de diferentes maneiras na tubulação e podem também formar emulsões. Emulsões de óleo e água são frequentemente encontradas em petróleo nas suas fases de processamento e produção. Esse problema ocorre principalmente na produção de petróleo em altas profundidades, devido à entrada de água nos dutos. A viscosidade da mistura água-óleo pode ser muito superior à viscosidade do óleo em si, tendo como consequência o aumento da queda de pressão e redução da capacidade de produção.

Na maioria dos casos, a viscosidade é medida em viscosímetros em condições controladas do escoamento. Para a medição da viscosidade de emulsões em condições mais próximas daquelas de operação dos dutos, normalmente, são utilizados loops de ensaios. Nesse caso o fluido é bombeado através de uma bancada de ensaios e a queda de pressão é medida em um trecho de tubulação. De acordo com Johnsen, Førde dal e Urdahl (1996), um aparato do tipo roda girante é uma alternativa especialmente interessante aos loops de ensaio. No caso da roda girante o fluido não passa por unidades de bombeamento, o que pode alterar as características das emulsões. Outra vantagem é o volume de fluido utilizado na caracterização. No caso da roda alguns poucos mililitros são necessários, enquanto que em um loop de ensaios é necessário um volume grande, da ordem de centenas ou milhares de litros, dependendo do tamanho da bancada.

No presente trabalho buscou-se adaptar um aparato do tipo roda girante para a medição de viscosidade. A roda é composta por um aro envolto por uma tubulação por onde escoava o fluido. A montagem proposta também inclui sensores para a medição de velocidade, um motor elétrico para movimentar a roda e uma placa de aquisição de dados e controle da potência elétrica fornecida ao motor. Para o ajuste da potência fornecida a roda implementou-se um sistema de controle PID. Para a medição de viscosidade com o aparato, é necessário preencher a tubulação parcialmente com fluido e depois realizar uma calibração do torque fornecido à roda, para que ela gire em velocidade constante. A calibração foi feita utilizando fluidos com viscosidades conhecidas. Nas medições, o volume de fluido introduzido na tubulação foi mantido constante. Com a metodologia utilizada foi possível medir a viscosidade com uma incerteza da ordem de 10%, o que é alto, tendo em vista as incertezas que podem ser obtidas em viscosímetros, mas ainda assim os valores são interessantes, considerado que as condições do escoamento são próximas daquelas encontradas nas tubulações.

1.2.Objetivos

O objetivo deste trabalho foi implementar um controlador do tipo PID para o ajuste da velocidade de uma roda giratória e calibrar o dispositivo para a medição da viscosidade de fluidos. Neste trabalho focou-se em medições de misturas de fluidos Newtonianos e com viscosidades conhecidas. Posteriormente, pretende-se aplicar a metodologia desenvolvida para medição de viscosidade de emulsões e misturas de fluidos com polímeros redutores de atrito. O intervalo de números de Reynolds escolhido para as medições foi de aproximadamente 10000 a 50000. Nessa faixa o escoamento no interior do tubo era sempre turbulento.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Nesta seção faz-se uma revisão de alguns conceitos básicos e que são necessários para a compreensão do problema estudado.

2.1. Definição de viscosidade

A viscosidade é a propriedade que caracteriza a resistência interna de um fluido (gás ou líquido) ao fluxo, sendo entendida como a medida de atrito entre as moléculas em um fluido. De uma maneira mais sucinta, é definida como a medida da fricção interna de um fluido, que ocorre quando uma camada do fluido se move em relação à outra camada ou a um objeto. Quanto maior a fricção, maior a força necessária para causar esse movimento, o que se dá o nome de cisalhamento. O cisalhamento ocorre sempre que há um movimento ou distribuição do fluido, como, por exemplo, em vazamentos, espalhamento, pulverização e misturas.

A viscosidade é um dos principais fatores na geração de turbulência. Um efeito importante da viscosidade é provocar a aderência do fluido à superfície. Isso é conhecido como uma “condição de não-escorregamento”.

A taxa de deformação do fluido está relacionada com a viscosidade do mesmo. Para uma certa tensão, um fluido com viscosidade baixa deforma-se numa taxa maior do que um fluido com alta viscosidade.

Considerando o modelo da figura abaixo, Isaac Newton definiu viscosidade da seguinte maneira: dois planos paralelos, com áreas iguais, de um fluido, estão separados por uma distância dx e se movendo na mesma direção em velocidades diferentes v_1 e v_2 .

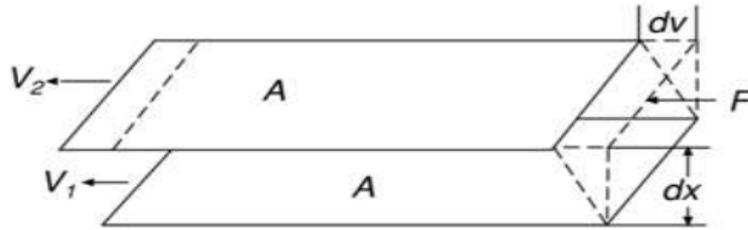


Figura 2-1: Movimento relativo das partículas do fluido na presença de tensão de cisalhamento.

Newton assumiu que a força necessária para manter essa diferença de velocidade é proporcional ao gradiente de velocidade, obtendo-se assim:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dx}$$

Onde μ é a viscosidade do material, dv/dx é o gradiente de velocidade e F/A é a força sobre unidade de área requerida para o cisalhamento. Fluidos com tensão de cisalhamento diretamente proporcionais ao gradiente de velocidade são chamados de fluidos newtonianos. Os fluidos mais comuns, como água, ar e óleo, são newtonianos. Os fluidos não newtonianos, na maior parte das vezes, têm uma composição molecular complexa. Podemos ver a diferença deles em relação a taxa tensão – deformação abaixo:

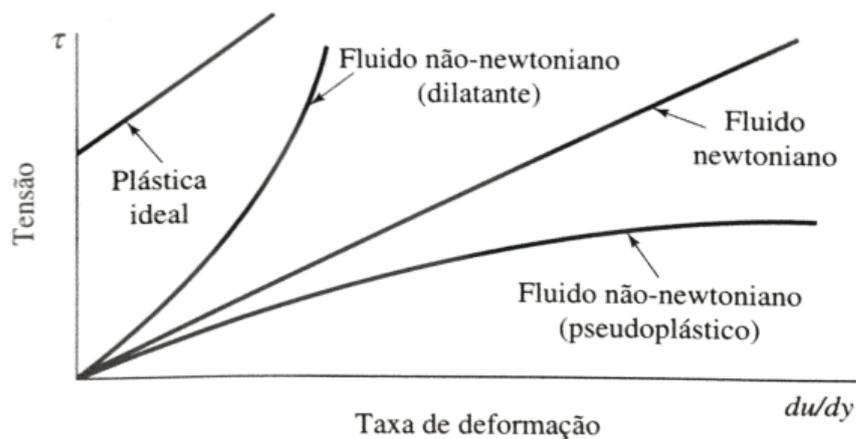


Figura 2-2: Movimento relativo das partículas do fluido na presença de tensão de cisalhamento.

O estudo da viscosidade é importante para, por exemplo, lubrificantes, promovendo a capacidade de suportar cargas, pois quanto mais viscoso um óleo,

maior a carga suportada. A camada de óleo evita o contato direto entre as peças, que causaria um atrito excessivo, gerando temperaturas elevadas.

Como a viscosidade é muitas vezes dividida pela massa específica do fluido na obtenção das equações, tem sido comum e útil definir a *viscosidade cinemática* como:

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

onde v é a viscosidade cinemática.

Nesse trabalho uma roda girante será utilizada para a medição da viscosidade dinâmica de fluidos Newtonianos.

2.2. Fatores que alteram a viscosidade

A viscosidade de um fluido newtoniano depende do estado do material. Assim, $\mu = \mu(T,P)$. Como a temperatura é a variável mais importante, iremos considerá-la primeiro. Existem excelentes equações empíricas para a viscosidade como uma função de temperatura.

Um dos principais alteradores da viscosidade é a temperatura, onde as forças coesivas têm papel dominante. A equação abaixo aproxima as curvas de viscosidades. Podemos perceber que, com o aumento da temperatura, a viscosidade decresce:

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T-C}}$$

Na equação acima as constantes são, tipicamente, determinadas através de ensaios experimentais. Nos gases as tensões internas acontecem pelas colisões moleculares, resultando em um acréscimo de temperatura, que aumenta a atividade molecular, aumentando a viscosidade. Já para os líquidos, a viscosidade é bem maior que a do gás, se comparado com a mesma diferença de temperatura. Como as forças coesivas são muito insensíveis à pressão, temos que $\mu = \mu(T)$ para os líquidos e gases.

No presente trabalho a viscosidade é medida para líquidos a temperatura constante. Não foi realizada nenhum teste com variação de temperatura, apesar disso ser possível com adaptações simples ao aparato.

2.3. Escoamentos turbulentos desenvolvidos em tubos

Os escoamentos internos são geralmente turbulentos, com exceção de fluidos bastante viscosos escoando em tubos de diâmetro pequeno. A dinâmica dos escoamentos turbulentos pode, por exemplo, alterar a dispersão das fases em um escoamento composto por fluidos imiscíveis. Dependendo da estabilidade da emulsão, pode ser interessante que a caracterização da mistura seja realizada o mais próximo possível das condições de escoamento dos fluidos.

O grupo adimensional mais relevante para escoamentos de fluidos Newtonianos em tubulações, sem transferência de calor, é o Número de Reynolds, que é dado por.

$$Re = \frac{VL}{\nu}$$

onde que L é um comprimento característico, V é uma velocidade, e ν é a viscosidade cinemática. O número de Reynolds é muito importante, uma vez que, com ele, podemos determinar se o escoamento é laminar ou turbulento.

Nos escoamentos laminares, a taxa de cisalhamento depende somente do número de Reynolds. Já nos casos turbulentos, existem outros fatores que influenciam o cisalhamento tal como a rugosidade das superfícies, por exemplo. Existem diversas correlações para estimar a taxa de cisalhamento e conseqüentemente o fator de atrito de tubulações sob regime de escoamento turbulento. Nesse trabalho buscou-se utilizar algumas correlações para avaliar a resposta obtida com o aparato.

3 METODOLOGIA

Na metodologia proposta, a viscosidade de fluidos foi medida com uma roda girando à velocidade constante. Para isso, foi implementado um controlador do tipo PID para ajuste da velocidade. A partir daí, realizaram-se ensaios, para a medição do torque necessário para garantir uma velocidade de giro constante sob diferentes condições. Primeiramente, caracterizou-se o dispositivo em vazio. Depois foram realizados ensaios com a tubulação parcialmente preenchida com diferentes fluidos. As viscosidades desses fluidos foram caracterizadas com um viscosímetro padrão e os dados foram utilizados para calibrar o equipamento. A partir da calibração, foram realizadas medições de viscosidades de misturas de água e glicerina e os resultados mostrados são apresentados na seção de resultados.

O detalhe de cada dispositivo utilizado na bancada de testes é fornecido nas seções a seguir.

3.1.Componentes da análise experimental

3.1.1. Aro

Foi utilizado um aro de bicicleta de 26 polegadas de diâmetro. No centro do aro temos o eixo acoplado por onde será transmitido o torque, fazendo com que o mesmo entre em movimento giratório. Envolto ao aro, temos a tubulação por onde escoará o fluido a ser estudado.



Figura 3-1: Aro.

3.1.2. Tubulação

A tubulação é composta por duas mangueiras trançadas e transparentes de PVC. O diâmetro interno é de uma polegada e envolve o aro da bicicleta de 26 polegadas de diâmetro, de modo a possibilitar a rotação da tubulação em torno do eixo do aro e mantendo, assim, o formato circular da tubulação. O raio do centro do aro ao centro da tubulação é de 0.345 m.



Figura 3-2: Tubulação.

3.1.3. Sensor infravermelho

O sensor photogate permite um tempo extremamente preciso de eventos dentro de experimentos de física, para estudar queda livre, colisões de trilhas aéreas, períodos pendulares, velocidade de um objeto rolante, entre outras coisas.

O photogate possui uma porta de entrada, de modo que vários gates podem ser conectados em uma configuração com até quatro gates, indo para um único canal de interface.

O modo porta laser requer a adição de um lápis de caneta comum, que é direcionado para a porta laser. O laser pode estar a alguma distância do portão, de modo que você possa medir a velocidade de objetos maiores, como foguete, modelo de carro ou mesmo um automóvel real.



Figura 3-3: Sensor Photogate.

3.1.4. Engrenagem

A engrenagem foi projetada no programa Solidworks 2016, de forma que seu diâmetro interno fosse o mesmo do eixo responsável por transmitir o torque à roda. Será acoplada a engrenagem ao eixo, onde ambas entrarão em movimento giratório solidariamente.

Após a conclusão do desenho, a mesma foi produzida no Laboratório de Design da PUC Rio através de impressão 3D.

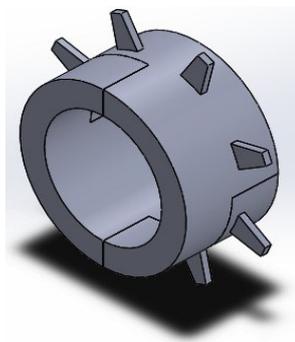


Figura 3-4: Engrenagem desenhada em Solidworks.

Figura 6:

3.1.5. Estrutura de fixação

A estrutura que sustenta a roda é a mesma que segura o motor elétrico. Ela possui um formato cúbico com 60 cm de altura e 50 cm de largura, e é demonstrada na figura a seguir:



Figura 3-5: Estrutura de fixação.

Esse formato evita as vibrações ocorridas devido à qualquer desbalanceamento ou excentricidade. Se ocorrer qualquer coisa que afete na estabilidade do aparato, o comportamento do escoamento pode ser alterado, afetando diretamente nos resultados no experimento.

3.1.6. Motor Elétrico

Utilizou-se no experimento um motor DC de 12 V com caixa de redução. Através do motor elétrico é possível controlar a velocidade de rotação do aro. Com isso, podemos encontrar a velocidade do escoamento e definimos assim o número de Reynolds, garantindo a presença de um escoamento turbulento.

Para a utilização do motor elétrico foi utilizado uma fonte de regulagem analógica com a fonte ligada à um arduino, sendo possível regular a corrente e a tensão imposta ao motor.

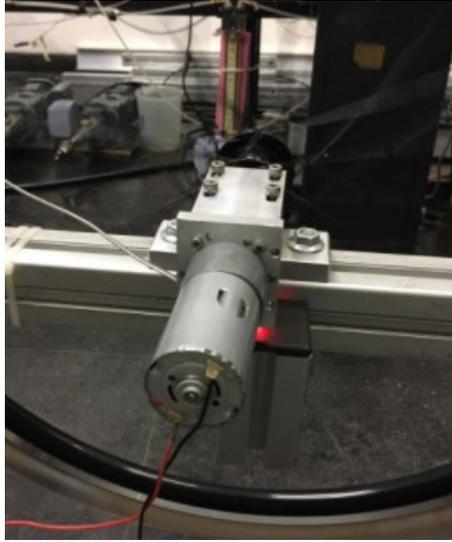


Figura 3-6: Motor elétrico acoplado ao sistema.

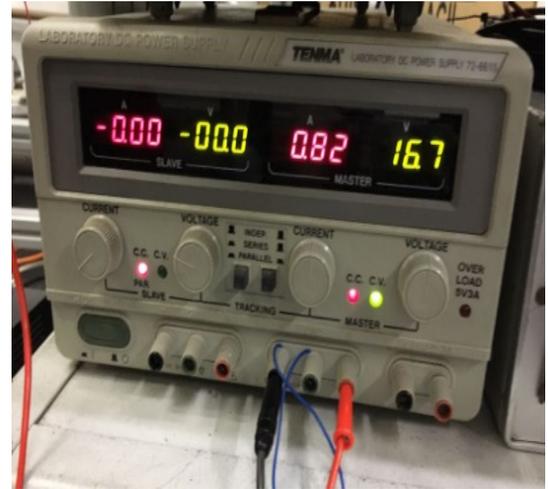


Figura 3-7: Fonte do motor elétrico.

3.1.7. Arduino

O Arduino é uma plataforma de desenvolvimento composta por um Hardware e um IDE (ambiente de desenvolvimento integrado). O arduino utilizado neste experimento foi o Nano, que é composto por 14 pinos digitais, podendo ser usados tanto para entrada, quanto para saída de dados. Esses pinos trabalham com 5V, podendo receber ou fornecer, no máximo, 40 mA em cada um deles. Caso ocorra uma sobrecarga nos pinos, a placa pode ser danificada. Esse arduino possui um conector mini USB, podendo ser alimentado com uma tensão entre 5V até 20V através de uma fonte externa não regulada ou da própria porta USB de um computador.



Figura 3-8: Placa de arduino.

A velocidade da roda foi ajustada com um controlador do tipo PID (Proporcional, Integral e Derivativo). O algoritmo do controlador foi implementado

utilizando bibliotecas disponíveis no software LabView. A referência para o controlador era ajustado via usuário no programa de controle. A leitura da velocidade era realizada com o photogate. A diferença entre referência e sinal medido era utilizada como entrada para o controlador. O sinal de saída do bloco de controle era utilizado para ajuste de uma saída PWM (pulse width modulation) da placa arduino. O sinal dessa saída não tinha potência disponível para acionamento do motor. Por isso, esse sinal foi utilizado para chavear um transistor de potência TIP41C. O chaveamento desse transistor fornecia uma corrente variável para o motor e controlava a velocidade de giro do mesmo.

No ambiente Labview, criou-se uma interface para que o usuário pudesse visualizar e controlar os principais parâmetros de operação da bancada. Na tela era possível observar as leituras de corrente, tensão e consequente potência elétrica fornecidos ao motor. Além disso, os dados podiam ser exportados para arquivos ASCII. Nesse ambiente pode-se ajustar também os ganhos do controlador PID. Como os ensaios foram realizados à velocidade constante, não foi realizada uma otimização dos ganhos para um controle da rampa de aceleração da roda.

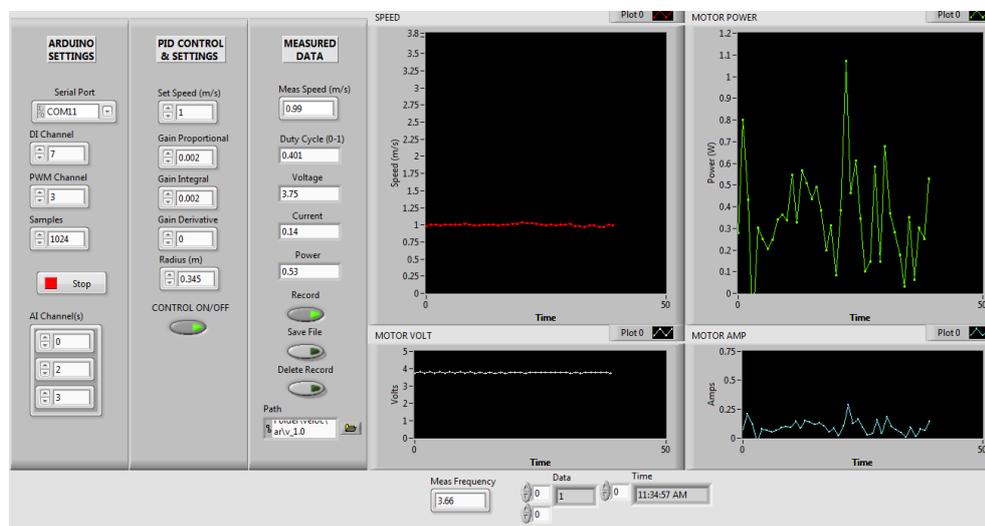


Figura 3-9: Representação do funcionamento do LabVIEW.

Na figura seguinte temos o diagrama de blocos do LabVIEW :

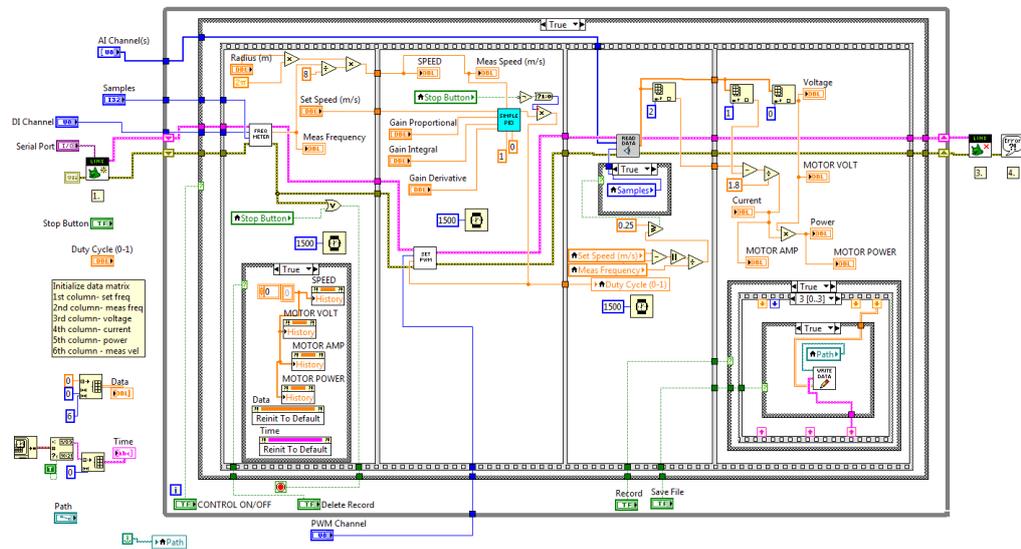


Figura 3-10: Diagrama de blocos do LabVIEW.

3.2. Descrição do experimento

Nesta seção será demonstrado o funcionamento do aparato experimental e todos os elementos que o compõem. Esse sistema foi montado numa bancada de forma a ter uma geometria simples. Na figura a seguir vemos todo o experimento montado:

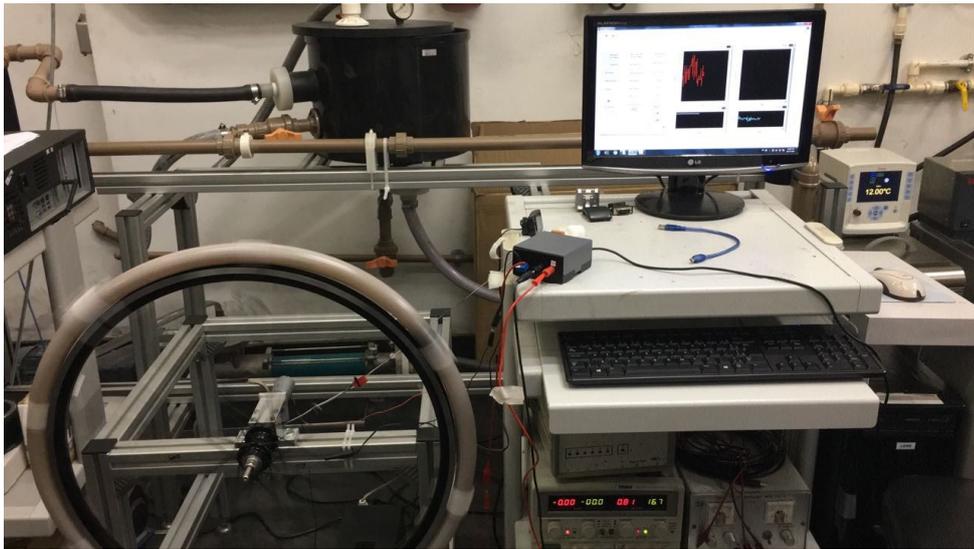


Figura 3-11: Montagem do experimento.

Um aro é envolto por uma tubulação por onde escoará o fluido a ser estudado. Um motor elétrico é acoplado à roda, conforme a Figura 3.6, com a função de aplicar um torque na mesma, fazendo-a girar. Para que o torque do motor seja transmitido à roda, é necessário a utilização de um eixo. A velocidade de escoamento do fluido é medida a partir de um sensor, que está acoplado exatamente no eixo da bancada, conforme a figura a seguir:

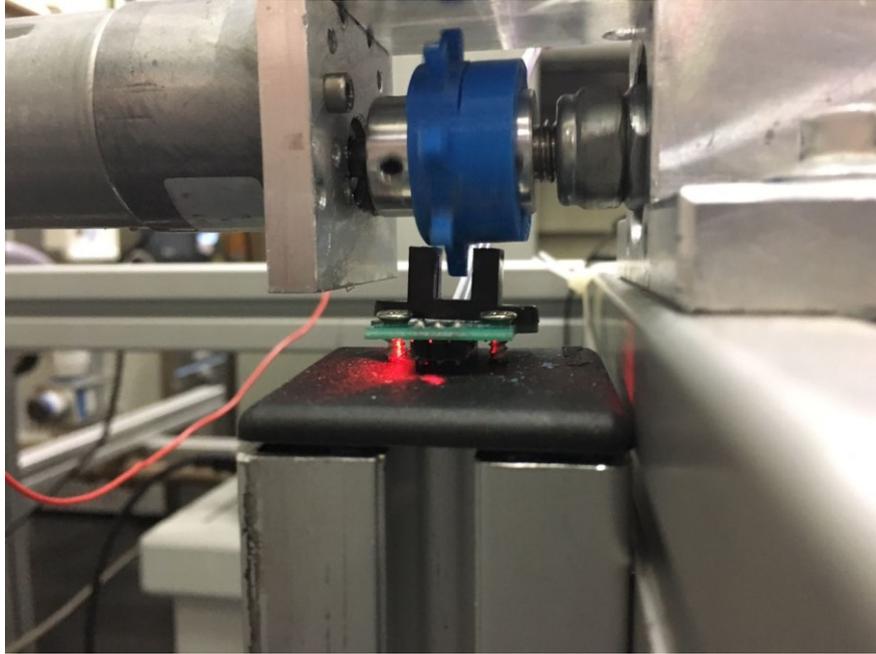


Figura 3-12: Sensor acoplado ao eixo e à engrenagem.

A medição de velocidade através do sensor infravermelho acontece da seguinte maneira: O infravermelho proveniente do sensor é apontado em direção aos dentes da engrenagem, que está acoplada ao eixo. Conforme acontece o movimento rotacional, o sensor capta o exato momento em que os dentes passam pelo sensor. Com isso, obtemos a frequência e conseqüentemente o tempo entre uma leitura e outra, podendo chegar a velocidade.

Foram utilizadas 6 velocidades diferentes (de 0,75 m/s à 2 m/s) para a análise, de forma a garantir que o escoamento seja turbulento. Um teste com a velocidade 0.5 m/s foi feito, porém não foi possível manter a roda em movimento enquanto esta possuía fluido em seu interior.

A análise experimental foi realizada com 3 soluções diferentes, sendo a última em várias concentrações de glicerina diferentes:

- Ar
- Ar + água filtrada
- Ar + Glicerina + Água (para 2.5%, 5%, 7.5% e 12.5% de glicerina)

A primeira medição, somente com ar, foi para garantir que torque medido no motor fosse apenas do fluido escoando na tubulação, pois nas medidas das soluções seguintes subtraíram-se o torque do motor pelo valor da roda com ar.

Todas as medições foram realizadas de maneira que tivesse uma quantidade maior de ar do que de líquido dentro da tubulação, para que a velocidade do escoamento se mantivesse estável e para que o fluido que escoar na parte inferior não se elevasse para a parte superior, passando assim para o outro lado. Para facilitar o entendimento, a seguir temos a representação do movimento giratório da tubulação, onde o fluido é representado pela cor azul e o gás pela cor vermelha:

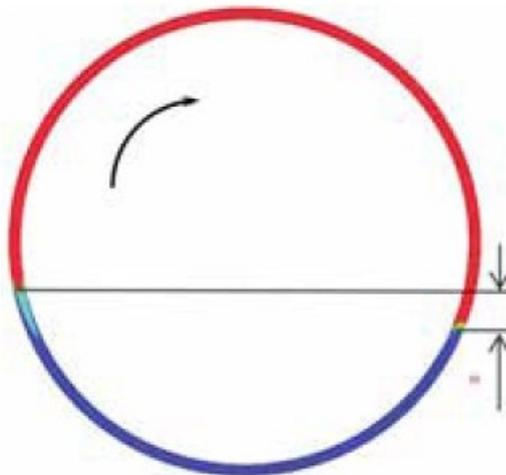


Figura 3-13: Representação do movimento giratório da tubulação.

3.3. Descrição das condições de fluxo

A derivação de valores de viscosidade corretos, que são provenientes dos valores de torque medidos, dependem de uma concepção confiável da dinâmica de "dentro da roda".

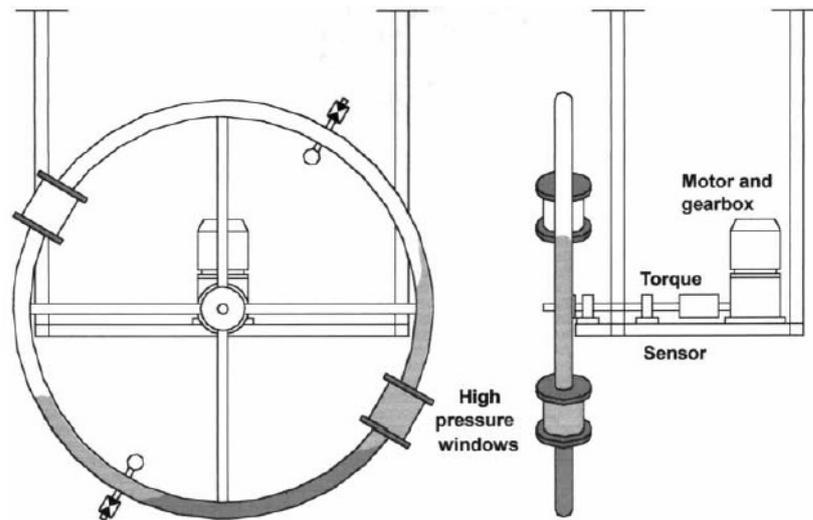


Figura 3-14: Demonstração da montagem.

Para este experimento, a medição de velocidade, torque e densidades para gás e líquido são extremamente importantes, bem como o comprimento da coluna líquida. Devido ao aumento da quantidade de líquido arrastado na parede do tubo, ocorrido com o aumento da velocidade, o torque será uma função de velocidade em forma de "s", como por exemplo na figura a seguir:

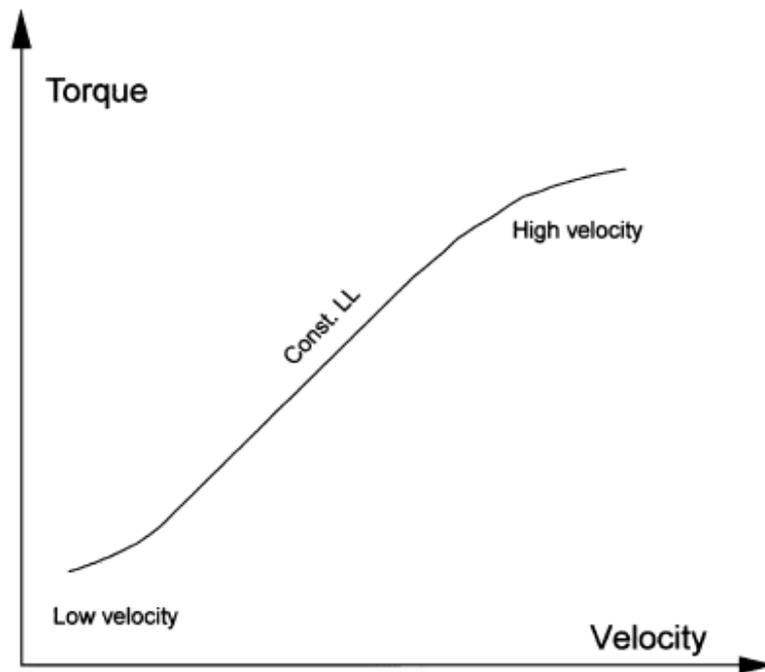


Figura 3-15: Curva mostrando torque em função da velocidade para um sistema.

Força de atrito

A força de atrito pode ser calculada com as seguintes relações:

$$\tau = \frac{2M}{LL\pi dD}$$

$$f = \frac{8\tau}{\rho v^2}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho v d}{\eta}$$

onde τ é a tensão de cisalhamento entre o líquido e o tubo parede (Nm^{-2}), M é o torque medido (Nm), LL é o Comprimento da coluna líquida na parede do tubo (m), d é o diâmetro do tubo (m), D é o diâmetro da roda (m), f é o fator de atrito de Moody, ρ é a densidade líquida (kg/m^3), v é a velocidade da roda (m/s), Re é o número de Reynolds, η é a viscosidade líquida (Pa.s).

Como foi dito anteriormente, o torque foi obtido utilizando os dados retirados do LabVIEW.

Para encontrar o comprimento da coluna líquida, foi realizada a medição da menor distância entre os limites do fluido a ser estudado. Com o software SOLIDWORKS, foi possível medir o comprimento de arco. Abaixo há um desenho esquemático mostrando a distância do arco encontrada, que é de 0.8277m

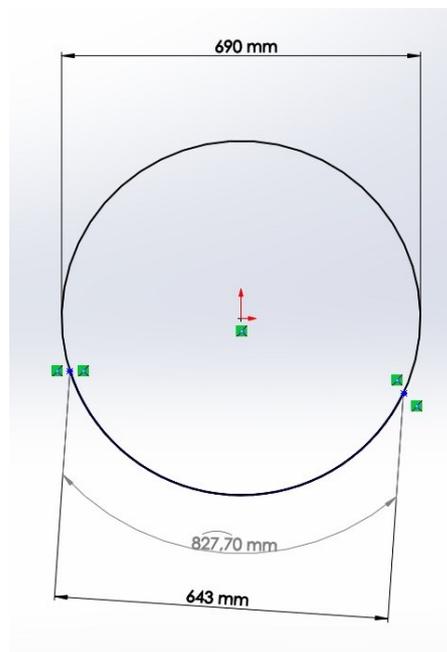


Figura 3-16: Valor de LL encontrado pelo SolidWorks.

Para o cálculo da densidade do líquido, um copo vazio foi pesado em uma balança, de marca GEHAKA modelo AG 200. Logo após, utilizou-se uma seringa para medir 5 ml do fluido. Após isso, o fluido que se encontrava na seringa foi adicionado ao copo e seu peso foi medido na balança. Podemos ver nas imagens que estão demonstradas a seguir:



Figura 3-17: Seringa utilizada no experimento.



Figura 3-18: Medição da massa do fluido.

Assim, subtraindo a massa do conjunto pela massa anteriormente medida com o copo vazio, temos por resultado a massa do fluido de trabalho. Com essa massa dividida pelo volume, temos a densidade do fluido que será utilizada para os cálculos de número de Reynolds.

Também foi medida, através do viscosímetro a seguir, a viscosidade de cada fluido utilizado:



Figura 3-19: Viscosímetro utilizado.

4 RESULTADOS

4.1. Calibração da Curva de Log(f) x Log (Re)

Com os dados obtidos pelo LabVIEW, os parâmetros medidos e utilizando as equações **acima**, foram calculados o fator de atrito e o número de Reynolds para as 6 velocidades da água, água + glicerina (5%) e água + glicerina (12.5%), sendo 10 testes realizados para cada velocidade, a fim de se obter uma melhor aproximação. Após isso, um gráfico log(f) x log (Re), contendo todos os pontos, foi gerado. Com a ajuda do excel, foi possível obter uma linha de tendência, sendo essa a linha de calibração utilizada:

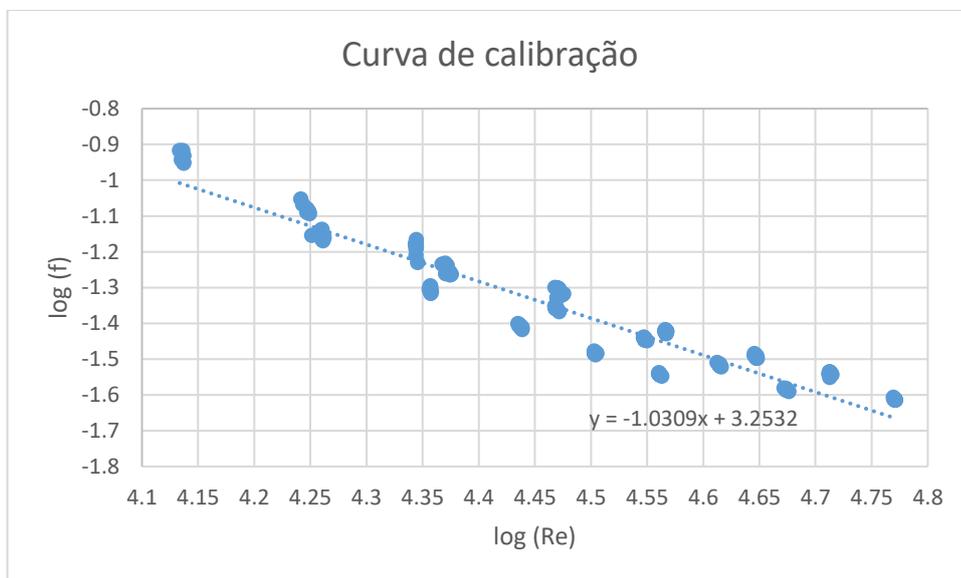


Figura 4-1: Curva de calibração.

4.2. Medição de viscosidade utilizando a roda giratória

Utilizando duas novas soluções, a linha de tendência obtida e os valores conhecidos, o fator de atrito foi calculado e, então, utilizando o gráfico, o $\log(\text{Re})$ foi encontrando. A partir desse $\log(\text{Re})$ e da equação conhecida de Reynolds, a viscosidade dos fluidos foi encontrada.

Para a solução de 2.5% de glicerina, os seguintes dados foram obtidos:

η viscosímetro	f	$\log(f)$	$\log(\text{Re})$	Re	η roda	erro (%)
1.000E-03	0.074243	-1.12934	4.249315	17754.75141	1.062E-03	-6.19652
1.000E-03	0.051629	-1.28711	4.402397	25257.88503	9.953E-04	0.467106
1.000E-03	0.040444	-1.39315	4.505288	32010.15859	9.817E-04	1.828415
1.000E-03	0.033632	-1.47325	4.58301	38283.39101	9.850E-04	1.49813
1.000E-03	0.029493	-1.53027	4.638341	43485.12877	1.012E-03	-1.17213
1.000E-03	0.024976	-1.60248	4.708406	51098.26805	9.840E-04	1.601737

Tabela 4-1: Dados usados para o cálculo da viscosidade dada pela roda para a solução de 2.5% de glicerina.

Para a solução de 7.5% de glicerina, temos os seguintes dados:

η viscosímetro	f	$\log(f)$	$\log(\text{Re})$	Re	η roda	erro (%)
1.200E-03	0.089011	-1.05056	4.172867	14889.05448	1.275E-03	-6.25943
1.200E-03	0.06043	-1.21875	4.336064	21680.23719	1.168E-03	2.700788
1.200E-03	0.045987	-1.33736	4.451158	28259.0879	1.120E-03	6.690637
1.200E-03	0.037432	-1.42675	4.537892	34505.79851	1.100E-03	8.299325
1.200E-03	0.032052	-1.49415	4.603285	40113.02769	1.104E-03	7.970734
1.200E-03	0.027095	-1.56711	4.674084	47215.39804	1.072E-03	10.64483

Tabela 4-2: Dados usados para o cálculo da viscosidade dada pela roda para a solução de 7.5% de glicerina.

4.3. Dados obtidos

Utilizando o LabVIEW, as velocidades desejadas foram escolhidas e obteve-se uma tabela com a frequência [Hz], velocidade [m/s], voltagem [V], corrente [A] e potência [W] medidas para um certo tempo. Após a estabilidade, foi estabelecido um tempo de 30 minutos para obter os valores médios.

Time_Stamp	Set_v	Meas_freq	Volts	Ampere	Watt	Meas_vel
10:48:59 AM	0.75	2.94	4.518	0.044	0.199	0.797
10:49:07 AM	0.75	2.89	4.556	0.188	0.857	0.783
10:49:16 AM	0.75	2.83	4.515	0.013	0.057	0.767
10:49:25 AM	0.75	2.81	4.57	0.065	0.299	0.761
10:49:34 AM	0.75	2.73	4.515	0.093	0.421	0.74
10:49:42 AM	0.75	2.7	4.576	0.186	0.852	0.732
10:49:51 AM	0.75	2.64	4.515	0.13	0.587	0.715
10:49:59 AM	0.75	2.55	4.576	0.074	0.338	0.691
10:50:08 AM	0.75	2.46	4.518	0.081	0.367	0.667
10:50:16 AM	0.75	2.54	4.576	0.075	0.342	0.688
10:50:25 AM	0.75	2.59	4.515	0.124	0.559	0.702
10:50:33 AM	0.75	2.66	4.573	0.018	0.083	0.721
10:50:42 AM	0.75	2.68	4.518	0.139	0.627	0.726
10:50:51 AM	0.75	2.74	4.579	0.013	0.058	0.742
10:50:59 AM	0.75	2.86	4.518	-0.044	-0.199	0.775
10:51:08 AM	0.75	2.98	4.579	0.238	1.089	0.807
10:51:17 AM	0.75	3.02	4.518	0.136	0.614	0.818

Tabela 4-3: Dados obtidos pelo LabVIEW.

Para cada solução, 6 velocidades diferentes foram medidas, sendo 10 testes feitos para cada velocidade. É importante notar que, para cada troca de fluido, houve uma limpeza e secagem do tubo, para que o fluido anterior não interferisse nos resultados. A temperatura no início e no final de cada teste também foi medida, para garantir que não houvesse uma diferença de temperatura que interferisse no experimento, uma vez que a temperatura é de extrema importância na viscosidade de um material. A diferença de temperatura máxima atingida foi de 1 °C, portanto foi desconsiderada a interferência da temperatura neste experimento.

- a) **Ar:** Primeiro os dados foram medidos utilizando-se o ar, como podemos ver na tabela a seguir, que já mostra os valores médio de cada velocidade:

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
ar	1.2922	0.0000172
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.187	1432.522
1	0.145	1908.045
1.25	0.118	2385.708
1.5	0.100	2862.277
1.75	0.087	3341.556
2	0.080	3815.940

Tabela 4-4: Dados obtidos do ar.

Nota-se que em velocidades mais altas, quando se tem o ar como fluido, o torque necessário para fazer a roda girar diminui, uma vez que este tem uma viscosidade muito baixa.

- b) **Água filtrada:** Após isso, os testes com 400 ml de água filtrada foram realizados. Como dito anteriormente, foi subtraído o torque encontrado total pelo torque com o ar como fluido de trabalho, uma vez que se queria obter apenas o torque exercido para a água. Abaixo podemos ver uma tabela com os dados obtidos:

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
água	986.72	0.00085
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.102	22097.635
1	0.137	29623.922
1.25	0.165	36869.789
1.5	0.203	44322.232
1.75	0.247	51657.886
2	0.272	58973.528

Tabela 4-5: Dados obtidos da água filtrada.

Para a medição da densidade e viscosidade, foram utilizados os métodos já citados acima.

- c) **Solução Água + Glicerina (2.5%):** Após a retirada e limpeza do fluido anterior, adicionou-se a solução de 390ml de água filtrada + 10 ml de glicerina. O torque obtido foi subtraído pelo torque do ar, novamente, para a obtenção do torque somente da solução. A tabela abaixo mostra os dados obtidos:

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
sol2.5	989.76	0.00100
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.117	18767.127
1	0.144	25477.986
1.25	0.176	31436.067
1.5	0.211	37692.572
1.75	0.252	43960.726
2	0.279	50299.643

Tabela 4-6: Dados obtidos da solução com 2.5% de glicerina

- d) **Solução Água + glicerina (5.0%):** Então, a solução de 380 ml de água filtrada + 20 ml de glicerina foi testada. Podemos ver na tabela abaixo os dados obtidos, sendo o torque exercido apenas pela solução.

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
sol5.0	991.62	0.00107
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.129	17669.84
1	0.157	23559.16
1.25	0.193	29441.01
1.5	0.227	35305.55
1.75	0.261	41164.39
2	0.293	47191.82

Tabela 4-7: Dados obtidos da solução com 5.0% de glicerina.

e) **Solução Água + glicerina (7.5%):** Colocou-se uma solução de 370 ml de água filtrada + 30 ml de glicerina, sendo o torque exercido apenas pela solução. Os dados obtidos estão abaixo:

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
sol7.5	996.6	0.0012
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.141	15895.858
1	0.170	21111.681
1.25	0.202	26422.145
1.5	0.237	31663.883
1.75	0.276	36939.800
2	0.305	42181.028

Tabela 4-8: Dados obtidos da solução com 7.5% de glicerina.

f) **Solução Água + glicerina (12.5%):** Para finalizar, uma solução de 350 ml de água filtrada + 50 ml de glicerina foi colocada no tubo, sendo o torque mostrado apenas o do exercido pela solução. Abaixo podemos ver os dados obtidos:

	ρ [kg/m ³]	μ [Pa.s]
sol12.5	1003.7	0.0014
v [m/s]	Torque médio [N. m]	Re
0.75	0.186	13685.74
1	0.199	18237.1
1.25	0.220	22759.02
1.5	0.250	27367.15
1.75	0.286	31902.89
2	0.325	36405.95

Tabela 4-9: Dados obtidos da solução com 12.5% de glicerina.

4.4. Gráficos

Com os dados obtidos foi possível gerar o gráfico velocidade x torque abaixo:

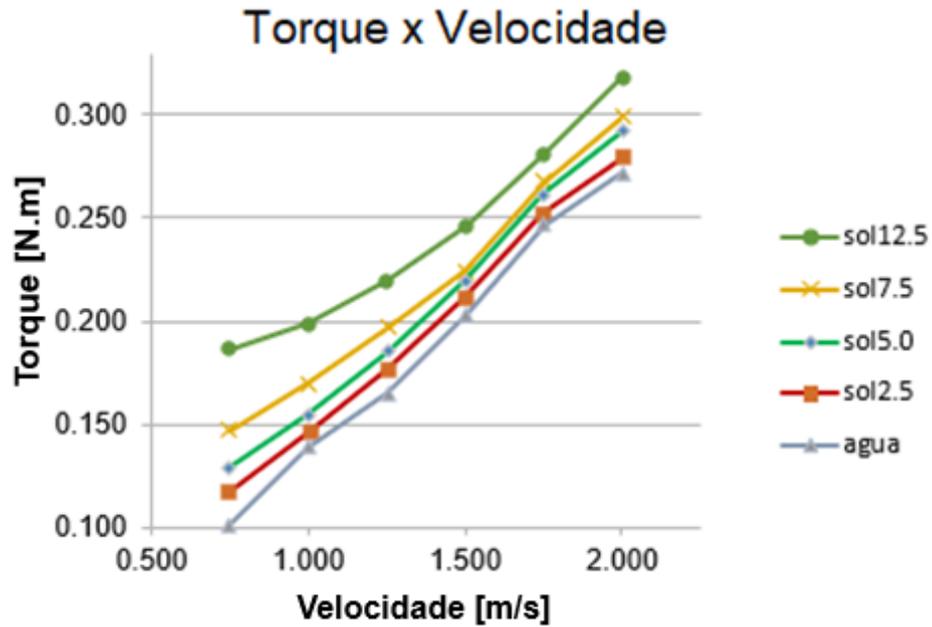


Figura 4-2: Gráfico do torque em função da velocidade para cada solução utilizada.

Podemos observar, pelo gráfico, que a velocidade e a viscosidade podem influenciar no torque necessário para fazer a roda girar. Com o aumento desses, o torque necessário aumenta.

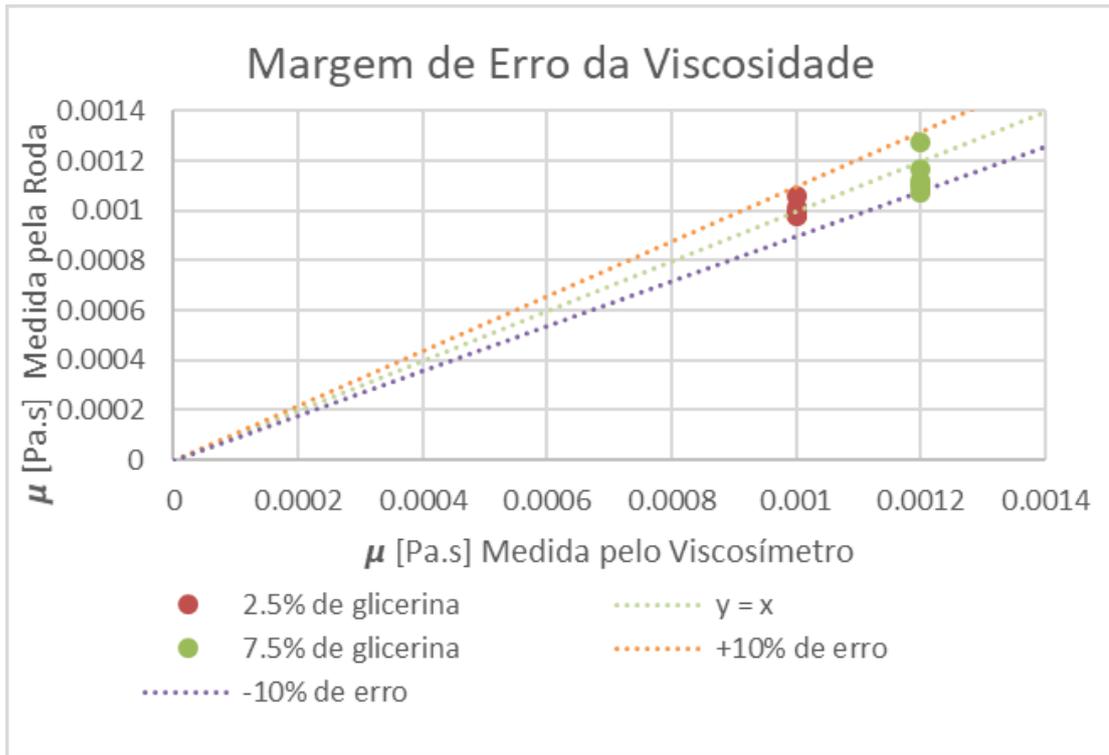


Figura 4-3: Margem de erro da viscosidade.

Esse gráfico nos mostra que a viscosidade medida pela roda, se comparada com a do viscosímetro, tem uma margem de erro de, no máximo, 10%.

5 CONCLUSÕES

A medição de viscosidade é importante para o transporte de fluidos em dutos, canais e tubulações. Na produção de petróleo, é comum a ocorrência de escoamentos com diferentes fluidos na mesma tubulação. Em alguns casos, os fluidos podem formar emulsões, que podem apresentar viscosidades maiores que cada fase separadamente. Para o projeto e operação de dutos é importante o conhecimento da viscosidade efetiva de emulsões em condições realísticas de operação. No presente trabalho buscou-se adaptar um aparato do tipo roda girante para a medição de viscosidade. De acordo com Johnsen, Førdedal e Urdahl (1996), um aparato deste tipo é especialmente interessante para medição de viscosidade de emulsões, pois o fluido não passa por unidades de bombeamento, que podem afetar as características das emulsões.

O dispositivo utilizado foi construído no Laboratório de Engenharia de Fluidos. O equipamento é composto por um aro envolto por uma tubulação por onde escoo o fluido. A montagem proposta também inclui sensores para a medição de velocidade, um motor elétrico para movimentar a roda e uma placa de aquisição de dados e controle da potência elétrica fornecida ao motor. Além disso, implementou-se um controlador PID para ajuste da velocidade de giro da roda. Essa implementação foi importante, porque nos ensaios de degradação de polímeros, que se pretende realizar no futuro, a velocidade tem que ser mantida constante, apesar do torque da roda variar ao longo do tempo.

Outro objetivo alcançado com sucesso no projeto, foi a calibração do dispositivo para a medição da viscosidade. A calibração foi realizada através da medição do torque aplicado, quando a roda girava à velocidade constante e a tubulação da roda era preenchida parcialmente com um fluido de viscosidade conhecida. A partir da calibração foram realizadas medições de viscosidades de misturas de água e glicerina e os resultados mostraram que, na faixa estudada, a metodologia permite a medição da viscosidade de fluidos Newtonianos dentro de uma margem de erro menor do que 10%.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JOHNSEN, Einar Eng; FØRDEDAL, Harald; URDAHL, Olav. A simplified experimental approach for measuring viscosity for water-in-crude-oil emulsions under flowing conditions. **Journal of dispersion science and technology**, v. 22, n. 1, p. 33-39, 2001.

JOHNSEN, Einar Eng; RØNNINGSEN, Hans Petter. Viscosity of 'live'water-in-crude-oil emulsions: experimental work and validation of correlations. **Journal of Petroleum Science and Engineering**, v. 38, n. 1, p. 23-36, 2003.

JOSÉ, F. et al. CFD SIMULATION OF THE TWO-PHASE FLOW OF DIFFERENT MIXTURES IN A CLOSED SYSTEM FLOW WHEEL. **Progress in Applied CFD**, p. 251, 2015.

MORI, Yasuo; NAKAYAMA, Wataru. Study of forced convective heat transfer in curved pipes (2nd report, turbulent region). **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 10, n. 1, p. 37-59, 1967.

URDAHL, Olav; FREDHEIM, Arne Olav; LØKEN, Karl-Petter. Viscosity measurements of water-in-crude-oil emulsions under flowing conditions: A theoretical and practical approach. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 123, p. 623-634, 1997.