

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Pedro de Almeida Lemos Barbosa

**Estudo do perfil de velocidade de
óleos pesados com viscosidade
dependente da temperatura**

Projeto de Graduação

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

Orientador: Luis Fernando Alzuguir Azevedo
Coorientador: Guilherme Moreira Bessa

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha família, especialmente meus pais Ivan e Elzinea, minha irmã Julia, por terem me amado e apoiado incondicionalmente durante toda essa minha jornada.

Ao meu professor Orientador Luis Fernando Alzuguir Azevedo e meu Coorientador Guilherme Moreira Bessa por terem acreditado e me ajudado incansavelmente no decorrer de todo o projeto, aos técnicos e funcionários do Laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC-Rio por sempre estarem dispostos a sanar quaisquer eventualidades.

Finalmente a PUC-Rio e todo seu corpo docente pelos ensinamentos aprendidos no decorrer desses anos e pelas amizades feitas.

RESUMO

O projeto tem como objetivo a complementação de estudos anteriores realizados no Laboratório de Mecânica dos Fluidos da PUC-Rio sobre o comportamento do escoamento laminar de óleos pesados em um duto isolado termicamente de forma a avaliar a queda de pressão em função da vazão, perfis radiais de temperatura e perfis de velocidade axial do escoamento. Em um escoamento hidrodinamicamente desenvolvido é de se esperar que a queda de pressão pela vazão se comporte linearmente, porém foi percebido em operações de campo que essa relação ao longo do duto se afasta do resultado esperado em certas faixas de vazão. Um experimento foi proposto para analisar esse fenômeno em laboratório: para o “fluido pesado” utilizou-se água destilada + glicerina, a utilização da água tem como objetivo estabilizar a solução visto que a glicerina quando exposta a ambientes úmidos tende a absorver parte dessa umidade, a viscosidade desta solução possui forte dependência com a temperatura, o que era primordial para o estudo em questão. Esta solução é aquecida em um reservatório durante um tempo sendo bombeada através da parte interna de um tubo longo. Este tubo é um trocador de calor de tubos concêntricos e na parte anular temos água destilada fria, trocando calor com a solução de glicerina. Essa troca de calor produziu fortes gradientes de temperatura (radiais e axiais) devido às grandes alterações de viscosidade.

Através dessa análise foi percebido em trabalhos anteriores que para valores altos e baixos de vazão volumétrica, o comportamento do fluido realmente condiz com o resultado linear esperado para escoamentos hidrodinamicamente desenvolvidos. Porém para valores intermediários essa relação se afasta muito do esperado, os resultados obtidos serão comparados com os trabalhos anteriores para melhor interpretação dos resultados.

Para o perfil de temperatura, foram usados termopares instalados anteriormente em diversos pontos da tubulação e os resultados possuíram forte assimetria devido aos escoamentos secundários gerados por convecção natural. Já para o perfil de velocidade foi utilizado a técnica de velocimetria laser-Doppler e os resultados não foram afetados por tais escoamentos secundários. Com isso, acredita-se que a falta de linearidade tenha a ver com a mudança de viscosidade junto à parede fria causando uma queda de pressão e não as variações de velocidade na parede (pois estas não sofreram muita alteração).

Palavras-Chave: Viscosidade, Temperatura, Velocidade, escoamento laminar, queda de pressão.

ABSTRACT

The project aims to complement previous studies carried out at the Laboratory of Fluid Mechanics of PUC-Rio on the behavior of laminar flow of heavy oils in a thermally isolated duct in order to evaluate the pressure drop as a function of the flow, radial temperature profiles and axial velocity profiles for the flow. In a hydrodynamically developed flow it is expected that the pressure drop by the flow behaves linearly, but it was noticed in field operations that the relation between flow and pressure drop along the duct departs from the expected result in certain flow ranges. An experiment was proposed to analyze this phenomenon in a laboratory: distilled water + glycerin was used for the "heavy fluid", the use of water aims to stabilize the solution since glycerin when exposed to humid environments tends to absorb part of that humidity, the viscosity of this solution has a high temperature dependence, which was paramount for the study. This solution is heated in a reservoir for a time, being pumped through the inside of a long tube. This tube is a heat exchanger of concentric tubes and in the annular part we have cold distilled water, exchanging heat with the glycerin solution. This heat exchange produced strong temperature gradients (radial and axial) due to large viscosity changes.

Through this analysis it was noticed in the previous works that for high and low values of volumetric flow, the behavior of the fluid really matches the expected linear result for hydrodynamically developed flows. However, for intermediate values, this relation is far from expected, the results obtained will be compared with previous studies for better interpretation of the results.

For the temperature profile, previously installed thermocouples were used at some points of the pipeline and the results had strong asymmetry due to the secondary flows generated by natural convection. For the velocity profile, the Doppler laser velocimetry technique was used and the results were not affected by such secondary flows. Therefore, it is believed that the lack of linearity has to do with the change of viscosity near the cold wall causing a pressure drop and not the variations of velocity in the wall (since these have not undergone much change).

Keywords: Viscosity, Temperature, Velocity, laminar flow, Pressure drop.

SUMÁRIO

1-INTRODUÇÃO	1
1.1. Contexto	1
1.2. Objetivo e Desafios dos Trabalho	2
2-REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Ockendon & Ockendon	4
2.2. Richardson	4
2.3. Whitehead e Helfrich	4
2.4. Wylie & Lister	5
2.5. Giessler et al.	5
2.6. Quinones & Carvalho	5
2.7. Nieckele, Azevedo & Carvalho	5
3-FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
3.1. Análise do Problema	6
3.2. Equacionamento	7
4-METODOLOGIA	11
4.1. Fluido de Trabalho	12
4.2. Montagem do Experimento	12
4.3. Trocador de Calor	13
4.4. Sistema de Aquisição de dados	15
4.5. Circuito da solução de glicerina	15
4.6. Circuito de fluido Refrigerante	17
4.7. Sensores de Temperatura e Pressão	17
4.8. Vazão	18
4.9. Fixação Laser	18
4.10. Perfil de Velocidade e Temperatura	19
4.10.1. Efeito Doppler	19
4.10.2. Técnica de velocimetria laser-Doppler	20
5-RESULTADOS	25
6-CONCLUSÃO	30

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
APÊNDICES	33
A.1 – Calibração das Bombas	33
A.2– Caracterização do fluido de trabalho	36
A.3– Análise de Incertezas do Projeto.....	37
A.4– Validação da seção de testes	38

Lista de figuras

Figura 1 - Processo de Transferência de Petróleo para FSO.....	1
Figura 2 – Representação esquemática do problema.....	6
Figura 3 – Representação 2D da seção de testes	11
Figura 4 – Vista em perspectiva seção de testes	13
Figura 5 – Foto Seção de Testes	13
Figura 6 – Vista em corte de uma extremidade do trocador de calor	14
Figura 7 – Sistema de aquisição de dados Agilent.....	15
Figura 8 – Placa Misturadora	16
Figura 9 – Cabeçote	16
Figura 10 – Banho térmico Frio	17
Figura 11 – Fotografia real da aquisição de dados de perfil de velocidade axial	19
Figura 12 – Placa estabilizadora	19
Figura 13 – Comportamento da luz em diferentes meios.....	21
Figura 14 – Seção longitudinal da janela de visualização	22
Figura 15 – Sonda termopar.....	24
Figura 16 – Gráfico de Perda de carga x Vazão Bomba média	25
Figura 17 – Gráfico do Perfil de velocidade para condições isotérmicas em $T=27^{\circ}\text{C}$	26
Figura 18 – Perfil de Velocidade Axial para bomba grande a 500 rpm	27
Figura 19 – Perfil Radial de Temperatura obtido pela Ref. [1] na primeira janela de medição.....	28
Figura 20 – Perfil Axial de Velocidade obtido pela Ref. [1] na primeira janela de visualização.....	29
Figura 21 - Viscosímetro MYR 3000	34
Figura 22 - Curva de Calibração Bomba Grande	34
Figura 23 - Curva Calibração Bomba Média	35
Figura 24 - Curva de Calibração Bomba Pequena	36

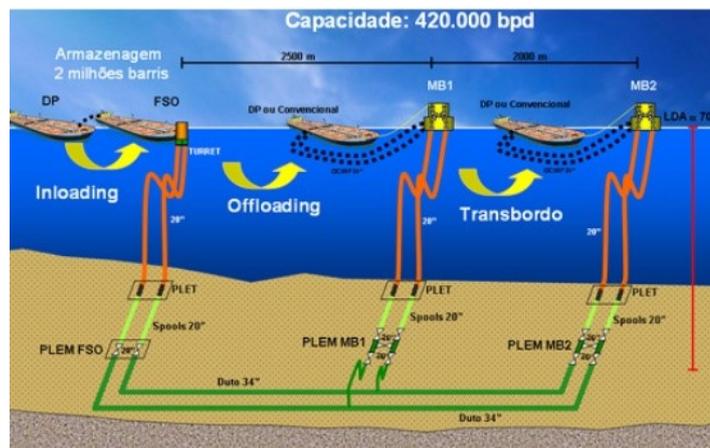
Lista de tabelas

Tabela 1 – Calibração Bomba NM011A	34
Tabela 2 - Calibração Bomba NM011B.....	35
Tabela 3 - Calibração Bomba 4N02	36
Tabela 4 - Incertezas.....	37
Tabela 5 – Perda de carga analítica vs medida Bomba Média	39

1- INTRODUÇÃO

1.1.Contexto

No Brasil, a maior parte do óleo produzido é do tipo pesado, ou seja, mais denso e viscoso. Alguns dos principais problemas desse óleo que podem ocorrer durante sua extração e transporte é o depósito de parafina na parede do duto, formação de hidratos, asfaltenos e o aumento da potência de bomba gerada pela mudança de viscosidade devido ao resfriamento do óleo. O resfriamento ocorre durante a transferência de calor que existe com a água em alta profundidade. O petróleo, ao trocar calor, perde energia para o meio e por consequência, aumenta sua viscosidade. Esse aumento durante o escoamento causa uma queda de pressão que por consequência reduz a velocidade do fluido, percebeu-se que para determinadas ocasiões do escoamento a dependência da viscosidade do óleo com a temperatura cria condições particulares onde o perfil de velocidade se afasta do perfil parabólico que é previsto para escoamento hidrodinamicamente desenvolvidos para fluidos Newtonianos. Para sanar este problema, aumenta-se a potência nas bombas, porém esse método não é ideal devido ao aumento no gasto de energético.



Fonte de Imagens: Agência Petrobras

Figura 1 - Processo de Transferência de Petróleo para FSO

Caso o duto fosse completamente isolado não haveria o problema da perda de energia do óleo com o meio e por consequência sua temperatura e viscosidade seriam constantes. Supondo agora que não haja nenhum tipo de isolamento no duto e que a transferência de calor entre a água de altas profundidades ocorra de forma muito

intensa. Nesse caso também ocorreria um escoamento com temperatura constante ao longo do duto e assim, conseqüentemente, viscosidade constante. Já no caso real temos perda de calor ao longo do tubo, isso faz com que exista gradientes de temperatura em cada seção do mesmo. Assim, a viscosidade não é constante, o que resulta em uma dependência da vazão com a queda de pressão. Essa relação de vazão x queda de pressão como observada em campo fugiu da relação linear que era esperada para escoamentos hidrodinamicamente desenvolvidos. Outro fator que também pode afetar na queda de pressão é a presença de correntes de convecção natural pois ela pode alterar o perfil de velocidade e temperatura do escoamento.

É muito importante que o engenheiro tenha o conhecimento dos mecanismos físicos que controlam esse fenômeno para poder projetar corretamente as instalações de bombas, garantir o escoamento do óleo e tornar o projeto mais seguro.

1.2. Objetivo e Desafios dos Trabalho

O presente projeto buscou o aprofundamento dos estudos do escoamento laminar de um fluido cuja a viscosidade tem forte dependência da temperatura, com o objetivo de simular e entender melhor alguns dos comportamentos observados em campo na hora da produção e da transferência de petróleo em regiões Offshore. Para a aquisição de dados foram utilizados em diversos pontos da seção termopares, dois medidores de pressão e a aplicação da técnica LDV em três janelas de visualização para a obtenção de perfis de velocidade, nessas mesmas três janelas existe uma sonda desenvolvida para medir perfil de temperatura, que com a ajuda de um micrômetro percorre toda a região de escoamento de glicerina no tubo interno.

A bancada de testes foi projetada e cada vez mais aprimorada em trabalhos anteriores (Ref. [1], Ref. [2] e Ref. [3]). No presente trabalho foi projetada uma base com travas para o laser correr em um trilho já existente que foi ajustado paralelamente a seção, houve uma mudança de posicionamento do trilho para melhorar a centralização do laser, que tem liberdade para se movimentar nos três eixos, há um controle computacional na direção y que através de um motor pode mover o laser em um curso para cima ou para baixo, com passes predeterminados, as outras duas direções são ajustadas manualmente.

Para a continuação dos projetos listados nas referências acima foram feitos os seguintes passos:

- Recalibração das três bombas da seção vide Apêndice A.1.
- Calibração do medidor de pressão Zurich, suas medidas foram comparadas com a solução exata da equação de perda de carga derivada de Navier-Stokes para a validação da mesma conforme Apêndice A.4.
- Caracterização do Fluido de Trabalho através da medição de viscosidades conforme Apêndice A.2.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Como já visto anteriormente nos estudos publicados por Bessa, Chalhub e Torres, para o cálculo da perda de carga de óleos pesados em dutos deve-se levar em consideração a equação de energia e a dependência da viscosidade com a temperatura.

A seguir estão descritos alguns dos trabalhos de pesquisadores sobre o assunto:

2.1. Ockendon & Ockendon

Conforme Ref. [4], em um escoamento laminar de um fluido newtoniano com baixo número de Reynolds cuja viscosidade era uma função exponencial da temperatura os pesquisadores a partir de hipóteses simplificadoras, como o fluxo de massa constante em um canal retangular cujas paredes sofrem grandes variações de temperatura, observaram um comportamento assintótico dos campos de temperatura e velocidade. Através desses estudos, Ockendon & Ockendon perceberam grandes variações de viscosidade com o aumento da temperatura.

2.2. Richardson

Continuando as pesquisas de Ockendon & Ockendon, Richardson, Ref. [5] realizou estudos com polímeros em tubulações de seção circular. Ele utilizou o modelo cuja viscosidade variava como uma função exponencial da temperatura e incluiu em seu modelo os efeitos de dissipação viscosa e solidificação próxima as paredes do duto. Observou com este experimento que um aumento na vazão do fluido pode levar a uma diminuição na queda de pressão.

2.3. Whitehead e Helfrich

O experimento foi estudado através do escoamento de xarope de milho por uma fenda com paredes resfriadas. Seu modelo foi realizado considerando a viscosidade do fluido linearmente dependente da temperatura, utilizando hipóteses de escoamento unidimensional onde o movimento é representado por uma média na seção transversal, obtiveram variações de viscosidades altas a valores diferenciados de

queda de pressão. A pesquisa envolvendo escoamentos representados por média na seção transversal foi continuado por Heilfrich, Ref. [6] e Ref. [7].

2.4.Wylie & Lister

O escoamento estudado foi desenvolvido em um sistema bidimensional e outro tridimensional, em um canal com paredes resfriadas e viscosidade dependente da temperatura. Ao final da análise foram realizados estudos sobre estabilidade linear em regime, Ref. [8].

2.5.Giessler et al.

O modelo estudado é governado pelas forças de Lorentz onde o fluido é representado pelo vidro fundido. O escoamento foi modelado como laminar e unidimensional em um tubo cujo fluido escoado era altamente viscoso. Foi levado em consideração uma dependência não linear da viscosidade com a temperatura e a propriedades elétricas do material, Ref. [9].

2.6.Quinones & Carvalho

Quinones & Carvalho, Ref. [10], tiveram como objetivo estudar o escoamento em dutos de óleos densos sob a ocorrência de altas taxas de transferência de calor com o leite marinho devido suas baixas temperaturas. O escoamento estudado como visto em outros modelos é laminar e a viscosidade varia exponencialmente com a temperatura. Porém, através do método de diferenças finitas resolveram equações unidimensionais para distribuição de temperatura e pressão ao longo do duto em função de sua vazão escoada.

2.7.Nieckele, Azevedo & Carvalho

Através de seus estudos criaram um modelo tridimensional para a resolução das equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento linear. Com isso houve a possibilidade através das simulações numéricas de uma análise mais aprofundada dos campos de velocidade e temperatura.

3- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Análise do Problema

Este capítulo abordará todos os fundamentos teóricos do problema e também seu equacionamento. Como já mencionado, o experimento tem como objetivo estudar o escoamento laminar através de um duto onde há troca de calor com o meio externo e o fluido escoado é um óleo pesado cuja viscosidade depende fortemente da temperatura. Para este experimento não foram utilizadas simulações analíticas ou numéricas. Os resultados deste experimento serão analisados e comparados com o estudo de outros pesquisadores sobre o mesmo tema.

O fluido é bombeado com uma vazão conhecida com temperatura de entrada T_e em um duto com um ângulo α com a horizontal, de comprimento L e seção reta circular de diâmetro D_i . Este fluido quente troca calor com o fluido externo (frio), que está a uma temperatura T_∞ . A seguir temos o esquema da Ref. [1] com a configuração do aparato experimental:

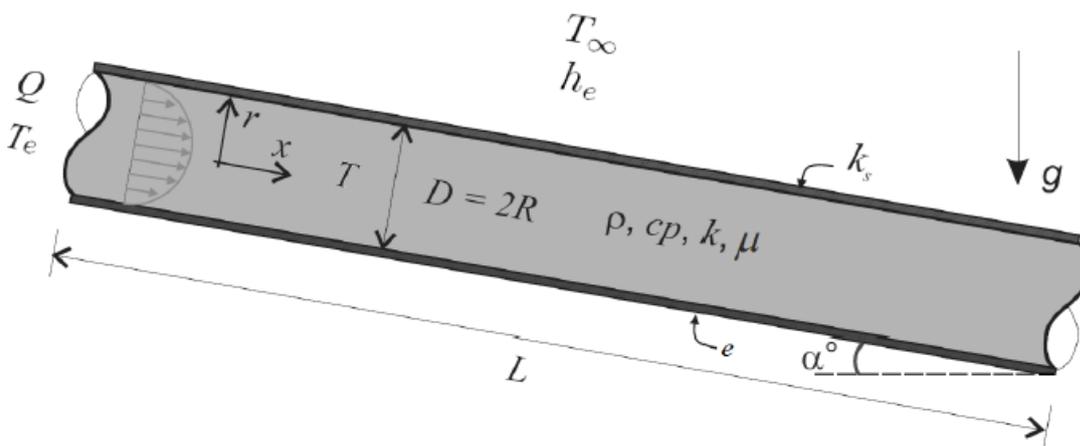


Figura 2 – Representação esquemática do problema

Temos que:

ρ : massa específica do fluido.

C_p : Calor específico a pressão constante do fluido.

k : condutividade térmica do fluido.

k_s : condutividade térmica do material do tubo.

h_e : coeficiente convectivo de troca térmica entre o tubo e o ambiente externo.

μ : Viscosidade dinâmica do fluido, sendo esta dependente da temperatura e o motivo principal de estudo deste trabalho.

3.2. Equacionamento

A análise do problema se dá através das equações de conservação de massa, de energia e quantidade de movimento linear. Todas estas equações são feitas a partir da condição de regime permanente, condição de simplificação do problema, e tiveram seus parâmetros devidamente adimensionalizados conforme Ref. [1].

- **Conservação de massa:**

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

- **Equação da quantidade de movimento linear:**

$$\rho_{ref} \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} = -\vec{\nabla} p + \rho_{ref} \left[1 - \beta_{ref} (T - T_{ref}) \right] \vec{g} + \vec{\nabla} \cdot \left[2\mu \overline{\overline{D}} \right]$$

onde $\overline{\overline{D}}$ é o tensor de taxa de deformação, β é o coeficiente de expansão térmica do fluido e \vec{g} é o vetor de aceleração da gravidade.

Temos então que $\overline{\overline{D}}$ é dado por:

$$\overline{\overline{D}} = \frac{1}{2} \left[\vec{\nabla} \vec{u} + \vec{\nabla} \vec{u}^T \right]$$

- **Equação de energia:**

$$\rho_{ref} c_p (\vec{u} \cdot \vec{\nabla} T) = k \vec{\nabla}^2 T + \Phi$$

$\Phi = \overline{\overline{D}} : \overline{\overline{\tau}}$ É a função de dissipação viscosa.

Para a resolução do problema as condições de contorno consideradas, são:

- Velocidade e Temperatura conhecidas na entrada do Tubo.
- Condição de não deslizamento nas paredes internas do Tubo.
- Na saída do tubo a difusão axial de calor e quantidade de movimento lineares são nulas.

Na parede interna do tubo temos a seguinte troca de calor como condição de contorno térmica :

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = U_{ef} (T_s - T_\infty)$$

Temos que U_{ef} é relacionado a área interna do tubo que considera a resistência condutiva da parede do tubo com condutividade k_s e o coeficiente convectivo externo de troca de calor h_e :

$$\frac{1}{A_i U_{ef}} = \frac{1}{A_e h_e} + R_{cond}$$

Para um tubo circular com diâmetro interno D_i e externo D_e , temos:

$$\frac{1}{U_{ef}} = \frac{D_i/D_e}{h_e} + \frac{D_i \ln(D_e/D_i)}{2k_s}$$

- Função de Quiones e Carvalho:

Para a solução do problema, utilizaremos a solução proposta por Quiones & Carvalho (2010), Ref. [10], para encontrar uma função que relacione a dependência da viscosidade do fluido com a temperatura. A solução é dada por:

$$\mu(T) = \mu_0 e^{\left(\frac{A}{T+B}\right)}$$

Onde A, B e μ_0 são parâmetros que serão ajustados pelos dados experimentais de viscosidade em função de temperatura para o fluido em estudo.

É necessário realizar um estudo adimensional utilizando o diâmetro do tubo para adimensionalizar os comprimentos. Os parâmetros adimensionalizados são mostrados a seguir:

$$\vec{x}^* = \frac{\vec{x}}{D_i}$$

$$\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{u_{in}}$$

$$p^* = \frac{p}{0,5 \rho_{ref} u_{in}^2}$$

$$Re = \frac{\rho_{ref} u_{in} D_i}{\mu_{ref}}$$

$$Gr = \frac{|\vec{g}| \beta_{ref} (T_e - T_\infty) D_i^3}{\nu_{ref}^2}$$

$$Pr = \frac{\mu_{ref} c_p}{k}$$

$$Ec = \frac{u_{in}^2}{c_p (T_e - T_\infty)}$$

$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_e - T_\infty}$$

Com as condições de contorno descritas, temos as seguintes equações adimensionais:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u}^* = 0$$

$$\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla} \vec{u}^* = -\frac{1}{2} \vec{\nabla} p^* + \frac{Gr}{Re^2} [\theta - \theta_{ref}] \vec{e}_i + \frac{1}{Re} \vec{\nabla} \cdot [2\mu^* \overline{D^*}]$$

$$\vec{u}^* \cdot \vec{\nabla} \theta = \frac{1}{Re \cdot Pr} \vec{\nabla}^2 \theta + \frac{Ec}{Re} \phi^*$$

Adimensionalizada a condição de contorno da parede interna do duto é:

$$\frac{\partial \theta}{\partial n^*} = \frac{U_{ef} D_i}{k} \theta = U_{ef}^* \theta$$

O final do duto não nos dá condições de contorno que forneçam mais parâmetros adimensionais. A seguir temos a forma adimensional da função de viscosidade dependente da temperatura:

$$\mu^* = \mu_0^* e^{\left(\frac{A^*}{\theta + B^*}\right)}$$

$$A^* = \frac{A}{T_e - T_\infty}$$

$$B^* = \frac{B - T_\infty}{T_e - T_\infty}$$

$$\mu_0^* = \frac{\mu_0}{\mu_{ref}}$$

Com:

Através das equações do problema podemos dizer que a solução para os campos de velocidade, pressão e temperatura para o duto (independente do ângulo α), depende dos seguintes parâmetros:

- Re: Número de Reynolds;
- Pr : Número de Prandtl;
- Gr : Número de Grashof;
- Ec : Número de Eckert;
- U_{ef}^* : Coeficiente de troca térmica adimensional;
- L/D_i : Comprimento adimensional do tubo;
- A^* , B^* e μ_0^* : os três coeficientes adimensionais que definem a dependência da viscosidade do fluido com a temperatura.

4- METODOLOGIA

Como visto anteriormente o projeto se iniciou mediante a validação da seção, para isso as curvas de calibração volumétricas da bomba foram obtidas conforme Apêndice A.1, testes isotérmicos foram realizados para comparar a perda de carga obtida no medidor de pressão Zurich e a perda de carga analítica mediante a equação de Navier Stokes, após a validação a solução de 95% glicerina e 5% de água foi novamente produzida para os testes finais visto que a solução que se encontrava na seção já havia absorvido muita água e, portanto não apresentava mais as características termofísicas que precisávamos para o teste, a figura esquemática da Ref. [3], da seção de testes é demonstrada a seguir:

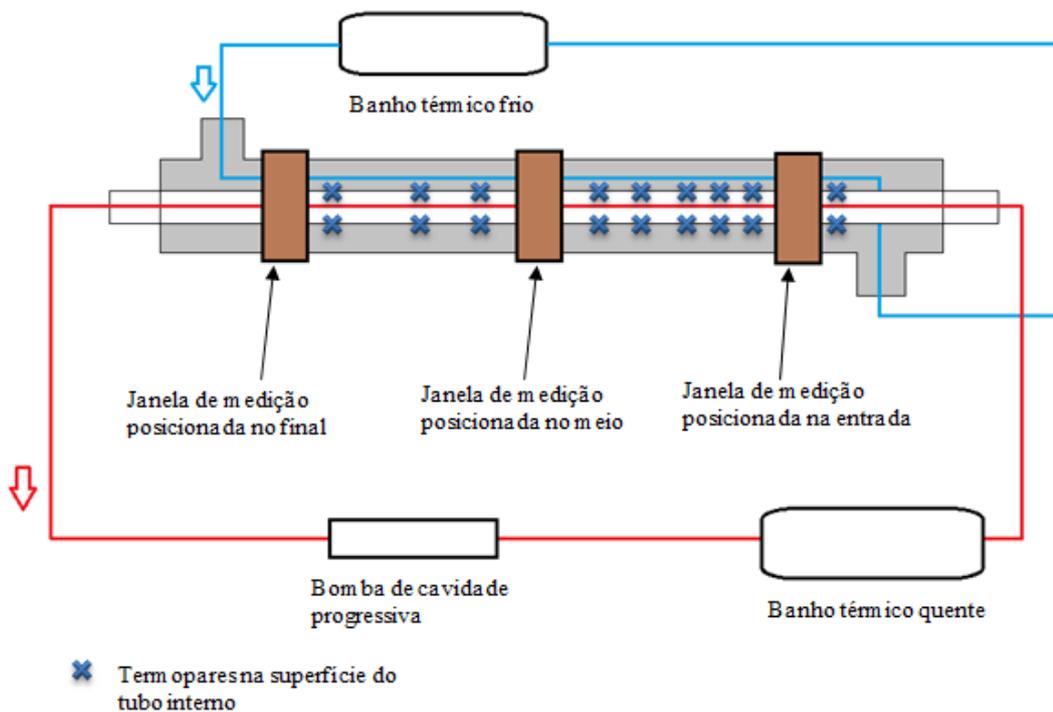


Figura 3 – Representação 2D da seção de testes

O procedimento seguido para a obtenção dos dados era a seguinte: ligam-se os aquecedores que esquentam a solução dentro do reservatório isolado até 70°C. Ao mesmo tempo ligamos um dispositivo que gira e está posicionado na parte inferior do reservatório com o objetivo de homogeneizar a solução e que por convecção forçada aumenta a troca de calor da mistura.

Utilizando uma das três bombas de cavidade progressiva, o fluido quente é bombeado para escoar no tubo interno, onde irá trocar calor com a água destilada proveniente do banho térmico frio que está a uma temperatura de 5°C. Com isso temos 18 termopares ao longo de toda a parede externa do tubo interno onde serão medidas suas respectivas temperaturas a fim de acabar com a necessidade de obter o coeficiente de troca térmica da água. Existem também termopares localizados na entrada e saída da mangueira de água, início e fim do interior do tubo interno e três sondas nas janelas de visualização para medir os perfis radiais de temperatura, todas essas medidas e a obtenção de pressão pelo aparelho Zurich são recebidas pelo sistema de aquisição de dados Agilent que transfere esses dados em forma de planilha no Excel. O perfil de velocidade foi medido por técnica de velocimetria Laser-Doppler em apenas uma das três janelas de observação, pois durante o projeto houve um vazamento no tubo interno que acarretou o atraso do cronograma.

4.1. Fluido de Trabalho

O fluido escolhido possui uma forte dependência de sua viscosidade com a temperatura e é transparente a luz, característica essencial, para o uso da técnica LDV, ele foi caracterizado conforme apêndice A.2.

4.2. Montagem do Experimento

A seção de testes é mostrada na Figura 4 a seguir:

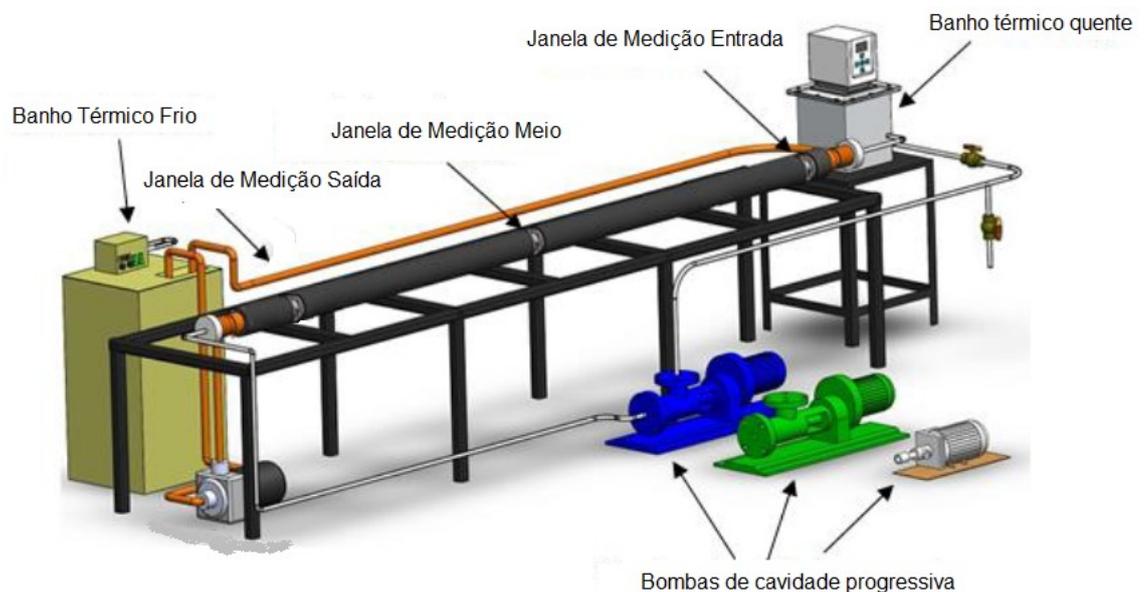


Figura 4 – Vista em perspectiva seção de testes

Como já mencionado, a solução de glicerina é mantida aquecida em um tanque isolado termicamente. Uma das bombas de cavidade progressiva é responsável por bombear essa solução na vazão desejada através do tubo interno, que está diretamente ligado ao tanque. A glicerina troca calor com a água que passa pela região anular do tubo. Esse fluido frio é bombeado através do trocador de calor por uma bomba centrífuga e ao final volta ao banho.

A seguir se encontra a imagem da montagem da seção de testes no Laboratório:

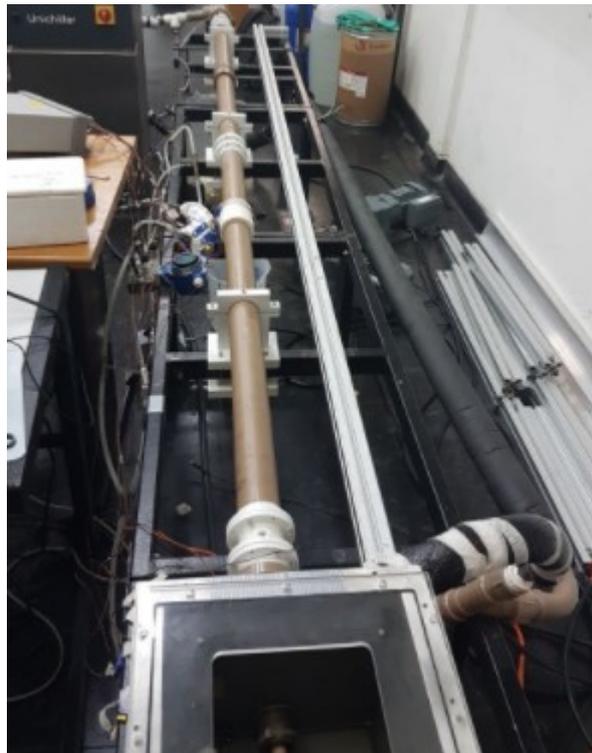


Figura 5 – Foto Seção de Testes

4.3. Trocador de Calor

O trocador de calor em questão é um trocador de tubos concêntricos. O tubo interno foi fabricado a partir de tubos do fabricante Tigre da linha Aquatherm (CPVC) pelo fato de ter uma baixa condutividade térmica apresenta diâmetro interno e externo igual a 11,8mm e 15mm respectivamente sua aplicação é ideal pois o mesmo apresenta um bom isolamento térmico, o tudo externo também é da marca Tigre, porém o material escolhido foi o PVC, seus diâmetros interno e externo são respectivamente 53,4mm e 60mm. O comprimento do tubo é de 3 metros, equivalente a 254 diâmetros, suficiente para garantir o desenvolvimento hidrodinâmico para todas

as faixas de Reynolds utilizadas. A tubulação foi selada em suas extremidades por flanges PVC conforme mostra a figura a seguir, vide Ref. [1]:

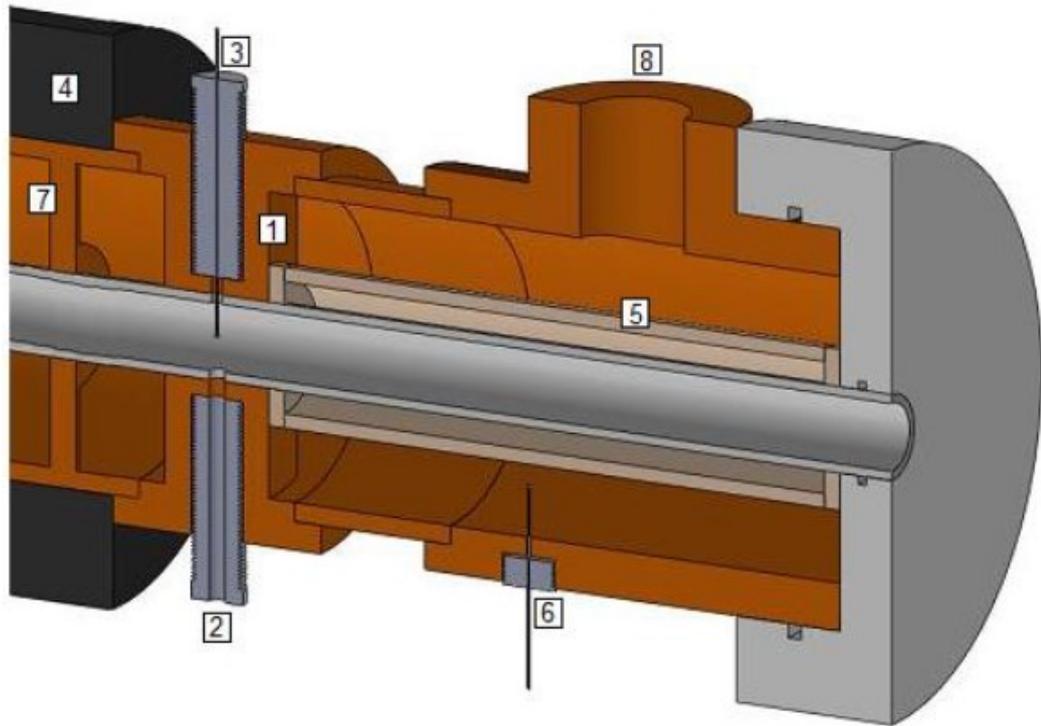


Figura 6 – Vista em corte de uma extremidade do trocador de calor

Esta figura em corte auxilia bastante na vista dos flanges montados na extremidade do tubo:

- Posição 1: Flanges que centralizam o tubo interno no espaço anular.
- Posições 2 e 3: Portas de acesso para medir temperatura e pressão no escoamento da solução da glicerina na entrada e na saída do tubo.
- Posição 4: Isolamento de borracha elastomérica de 30 mm de espessura, instalado na parte externa do tubo externo para minimizar a troca de calor da solução fria de refrigeração com o ambiente do laboratório, minimizando a potência de refrigeração do banho termostático frio.
- Posição 5: Tubo de PVC instalado em volta do tubo interno com objetivo de isolar termicamente o percurso da solução de glicerina desde o tanque aquecido até a posição onde estavam instalados os sensores de pressão e temperatura.
- Posição 6: Posição de instalação do termopar que monitora a temperatura de entrada da solução de refrigeração. O flange de saída também foi

instrumentado de modo similar para monitorar a temperatura de saída do fluido de refrigeração.

- Posição 7: Local de instalação de 3 peças para manter o tubo interno centralizado.
- Posição 8: Posição por onde o fluido de refrigeração entrava na seção anular através da abertura no flange.

4.4. Sistema de Aquisição de dados

As Medidas de pressão e temperatura foram computadas através de um sistema de aquisição de dados da Agilent, modelo 34970A. Para gerenciar esse processo, desenvolveu-se um programa de controle no Labview.



Figura 7 – Sistema de aquisição de dados Agilent

4.5. Circuito da solução de glicerina

A solução de glicerina era mantida em um reservatório com capacidade de 10 litros e isolado termicamente até que o fluido fosse aquecido. Sua temperatura era

controlada através do controlador Thermo Fisher Scientific-HAAKE DC30 conforme Figura 9 e da placa aquecedora e misturadora de modelo Fisatom 754 – 1000 W, conforme Figura 8, posicionada embaixo do reservatório térmico.

A partir daí o fluido é bombeado pela tubulação interna do trocador de calor com auxílio de uma das bombas de cavidade progressiva, sua rotação é controlada por um inversor de frequência de modelo CFW08 da WEG, suas vazões volumétricas conforme Apêndice A.1 são:

- NM011AA com 401,5 a 1162,2 ml/min
- NM011B com 34,3 a 443,98 ml/min
- 4N02 da Netzsch com 11,99 a 65,19 ml/min.

Para que o fluido retornasse ao reservatório, foi utilizado uma mangueira de borracha de ½” isolada termicamente.



Figura 9 – Cabeçote



Figura 8 – Placa Misturadora

4.6. Circuito de fluido Refrigerante

O fluido utilizado como refrigerante foi a água destilada. Como o ponto de Fusão da água é 0°C e o Projeto foi executado com o banho trabalhando a 5°C o fluido ideal a ser utilizado para uma margem de segurança maior seria uma solução de Água e Etilenoglicol, porém por falta do mesmo foi utilizado apenas água destilada. O controle de temperatura do fluido foi feito através de um banho termostáticos, da marca Huber e modelo Unichiller® 020T.



Figura 10 – Banho térmico Frio

4.7. Sensores de Temperatura e Pressão

Para a leitura dos dados de temperatura e pressão, o sistema de aquisição Agilent foi ligado diretamente aos termopares e ao medidor de pressão Zurich, por fim ao computador onde em tempo real era possível obter a temperatura de todos os termopares e a perda de carga da seção pelo Zurich. Existem instalados na seção termopares do Tipo T (Cobre-Constantan) e do Tipo E (Cromel-Constantan) ambos fabricados com fios de 75 μm de diâmetro com isolamento de teflon. O Agilent nos retorna para as medidas dos termopares a temperatura em °C e as medidas de pressão em Volts, foi feita uma tabela de conversão de Volts para mH2O e posteriormente Pascal a partir do resistor do medidor de pressão.

O medidor de pressão Zurich é do tipo diferencial piezoresistivo, modelo PSI.EX.H.DIF. Esse aparelho tem uma faixa de 0 a 1 mca com incerteza de $\pm 0,1\%$ do fundo de escala. Como mencionado anteriormente, as tomadas de pressão ligadas ao medidor possuem uma separação de 2840 mm. Também foi instalado um manômetro de mercúrio em paralelo ao Zürich, sendo sua escala de -100 a +100 mmHg e resolução de 2 mm, apenas para fins de comparação grosseira.

4.8. Vazão

A vazão de escoamento da solução de glicerina foi determinada a partir do processo gravimétrico. Todas as três bombas (NM011A, NM011B e 4N02) de cavidade progressiva tiveram suas curvas de vazão mássica X rotação determinadas, conforme Apêndice A.1, favorecendo o ajuste da medida de vazão para um dado número de Reynolds através da curva de calibração obtida da bomba acoplada ao sistema. Para medir a massa da solução foi utilizada uma balança modelo AG200 com resolução de 1 mg e um cronômetro de 0,5s de resolução para medir o tempo.

4.9. Fixação Laser

Foi projetada uma placa conforme figura 12 para que a base do laser fosse capaz de acoplar na mesma e em um trilho já existente na seção, o objetivo era que o laser pudesse andar nos três eixos cartesianos e que houvesse uma melhor fixação e alinhamento de seus feixes dentro do diâmetro do tubo interno, passando pela janela de visualização, a fim de obter o perfil de velocidade axial de maneira mais precisa. O trilho é de alumínio quadrado da marca BOSCH e foi utilizado como guia da placa projetada para encaixar nos furos da base do laser. A furação da placa foi feita no Laboratório de Engenharia mecânica da PUC-Rio por técnicos habilitados.

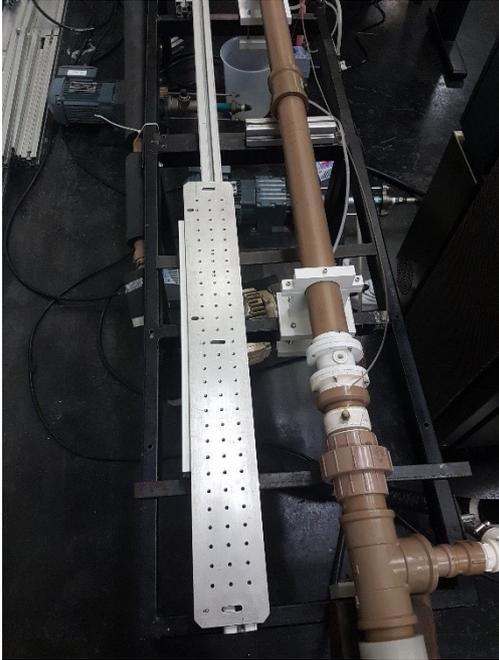


Figura 12 – Placa estabilizadora

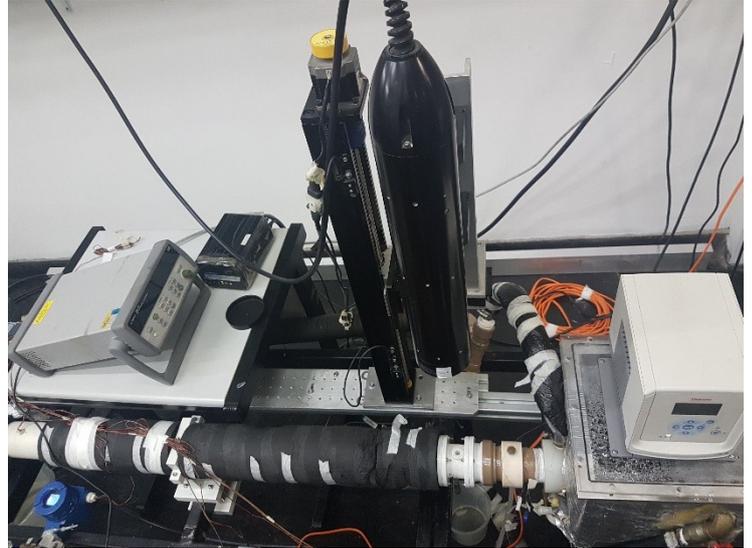


Figura 11 – Fotografia real da aquisição de dados de perfil de velocidade axial

4.10. Perfil de Velocidade e Temperatura

Um dos principais objetivos do experimento é obter perfis radiais de temperatura e axiais de velocidade, portanto as pretensões iniciais eram de fazer as medições nas três diferentes janelas de visualização ao longo do escoamento. Essas medidas ao longo de toda a tubulação nos fornecem ricos dados para melhor compreender os efeitos da variação da viscosidade com a temperatura ao longo da seção. Esses perfis radiais também fornecem meios para uma melhor validação dos códigos computacionais que foram desenvolvidos para este projeto. Entretanto devido à falta de tempo por problemas na seção apenas a janela da entrada será abordada.

4.10.1. Efeito Doppler

Vamos explicar o efeito Doppler com a seguinte situação: considere um observador parado na calçada de uma rua quando uma ambulância passa com a sirene ligada. O observador nota que a altura do som da sirene diminui repentinamente depois que a ambulância o ultrapassa. Uma observação mais detalhada revela que a altura sonora da sirene é maior quando a ambulância se aproxima do observador e

menor quando a ambulância se afasta. Então a frequência aparente do som, que atinge o observador partindo de uma fonte em movimento que se aproxima dele, é maior que a frequência real do som. Esse fenômeno junto com outras situações físicas nas quais ele ocorre é chamado de Efeito Doppler.

4.10.2. Técnica de velocimetria laser-Doppler

Conforme Ref. [1], Ref. [2] e Ref. [3] a técnica de medição instantânea da velocidade pontual continuou sendo a LDV, a fonte do laser emite radiação nas faixas do azul ao violeta, três feixes distintos são projetados, os mesmos apresentam comprimentos de onda distintos. Apenas foi utilizado o componente verde no experimento visto que estamos interessados apenas na velocidade axial do escoamento, o componente verde do laser apresenta dois feixes ao se cruzarem no ponto de interesse formam um elipsoide com eixos na ordem de 200 a 100 μm , sendo esta faixa satisfatória para a resolução do problema. Esse sistema óptico da TSI produz um semiângulo de convergência dos feixes de 3,97 grau, a uma distância focal de 350 mm no ar.

Essa técnica só pode ser usada pois a janela de visualização foi projetada especialmente para ela, visto que foram utilizados materiais transparentes a luz para que o feixe pudesse chegar a região de interesse. Para que o laser capture os dados partículas ocas feitas de vidro e recobertas por prata com diâmetro de 10 μm foram adicionadas ao fluido de trabalho, de modo que com o escoamento e os misturadores obtivesse uma distribuição homogênea na solução.

A fabricante do sistema laser-Doppler é a TSI, formado por um laser de íon Argônio INNOVA 70 com potência de 5W de fabricação SpectraPhysics.

Para chegar até a área de interesse ele teoricamente deve passar primeiro pelo fluido do banho térmico frio para depois chegar a solução de glicerina. Pela janela de visualização para chegar na área de interesse o feixe de luz passa pelos índices de refração de 1,000 do ar, 1,512 do vidro e 1,459 da solução de glicerina (obtida através de um refratômetro com uma amostra da solução), os diferentes meios ocasionam a refração e conseqüentemente foram levados em consideração nos cálculos de passe do laser, pois a distância focal varia com os diferentes meios.

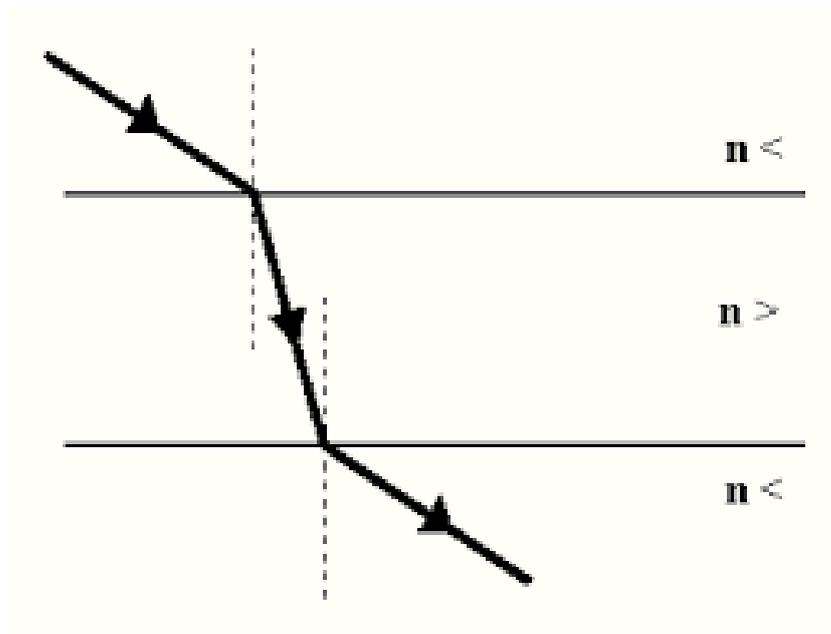


Figura 13 – Comportamento da luz em diferentes meios

Portanto em projetos anteriores, Ref. [1] e Ref. [3], as janelas de visualização foram confeccionadas e instaladas em três regiões de interesse da seção para minimizar esses efeitos de refração dos diferentes meios. Essa janela nos traz a possibilidade de obtenção do perfil de velocidade e temperatura simultaneamente e é demonstrada em vista explodida na Figura 14 a seguir:

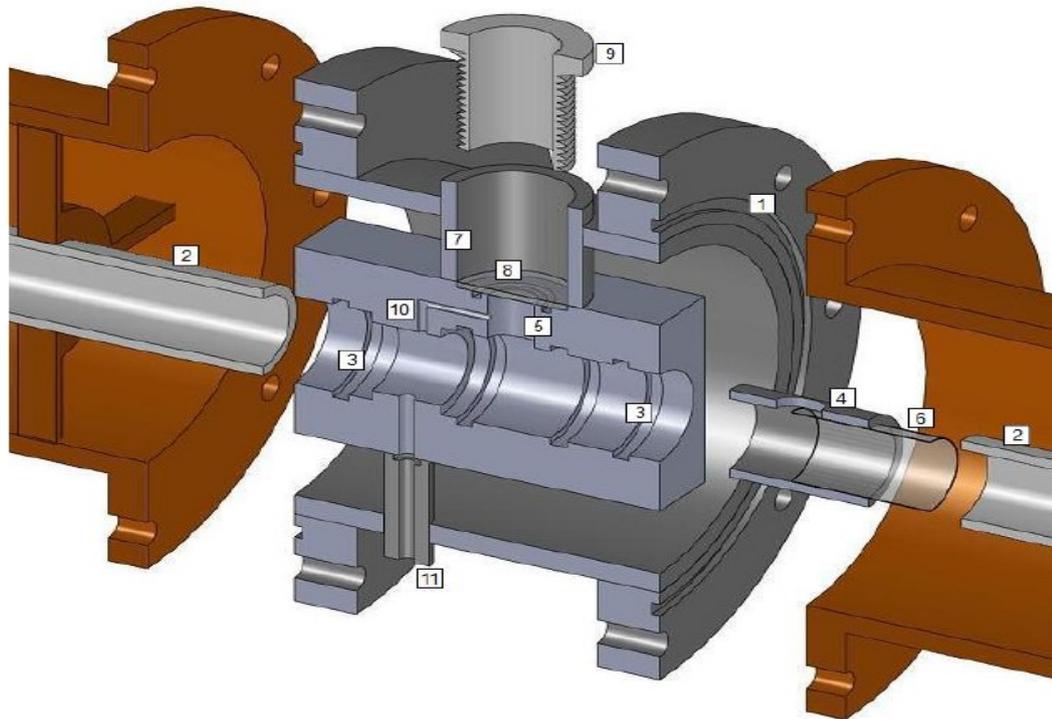


Figura 14 – Seção longitudinal da janela de visualização

Com essa vista seccionada do tubo interno e externo do trocador de calor podemos ver a união flangeada que era inserida em uma dada posição axial do trocador de calor onde se realizava as medições de perfil de velocidade, conforme Ref. [1].

- 1) Anéis de vedação de borracha que garantem a vedação do conjunto.
- 2) As duas partes do tubo interno seccionado que foram conectadas em cada um dos lados de um bloco de PVC usinado.
- 3) Anéis de vedação de borracha inseridos nas canaletas.
- 4) Tubo de acrílico com um furo circular em sua parede lateral, que foi introduzido no bloco de PVC entre as duas partes do tubo interno. Quando montado dentro do bloco, seu furo coincidia com o furo no bloco de PVC e com o tubo de PVC (número 7).
- 5) Furo no bloco de PVC. Para diminuir os efeitos da refração, este furo foi preenchido com a mesma solução de glicerina que escoava no tubo interno, sendo vedado pelo disco plano de acrílico (número 8).

Observação: A água de refrigeração continuava escoando no espaço anular contornando o bloco de PVC, enquanto a solução de glicerina e água escoava no tubo interno.

- 6) Filme plástico fino transparente, com espessura de 0,1 mm e colado na superfície interior do tubo de acrílico. Ele cobre toda a superfície interna do tubo de acrílico e possui o mesmo diâmetro que o tubo de PVC na parte do escoamento da solução de glicerina. Sua função é permitir o acesso óptico ao interior do tubo produzindo refração desprezível nos feixes de laser ao passarem na superfície curva devido à pequena espessura oferecida pelo filme.
- 7) Tubo de PVC, assim como o número 11.
- 8) Disco de plano acrílico que veda por meio de um anel de borracha o furo número 5 quando pressionado pelo tubo roscado (número 9). Com isso, os dois feixes entram pelo tubo PVC (de número 7), cruzam o filme fino e penetram no interior do tubo interno, onde há a solução de glicerina.
- 9) Tubo roscado que pressiona o disco plano de acrílico (número 8).
- 10) Canal de pequeno diâmetro usinado no bloco de PVC, conectado ao interior do tubo com o fluido aprisionado no tubo de número 5. O motivo desse canal é para evitar o problema no qual o nível de pressão no interior do tubo interno é diferente da pressão exterior. Logo, o filme fino transparente que dá acesso óptico ao laser poderia ser deformado pelo diferencial de pressão imposto sobre suas faces interna e externa.
- 11) Canal que dá acesso ao interior do tubo interno utilizado pela sonda termopar para obtenção do perfil radial de temperatura. Um tubo inox é introduzido nesse canal.

Com isso, o probe do sistema LDV se posiciona sobre a janela de visualização e o par de feixes penetra verticalmente no interior do tubo. Essa sonda foi montada em um trilho sob uma placa projetada especialmente para garantir o posicionamento estável da mesma em uma mesa de coordenadas automatizadas acionada por um motor de passo, que permitia deslocamentos nos três eixos de coordenadas.

Para a medição do perfil radial de temperatura conforme Ref. [1], uma sonda foi projetada, conforme Figura 15, a partir de um termopar tipo E de fios de Cromel e Constantan de 75 μm revestidos de teflon. Um tubo de aço inox de 10 mm de ponta feita em resina epóxi, 2 mm de diâmetro externo e 2 mm de diâmetro interno, e por onde o termopar é introduzido, tem o objetivo isolar termicamente o tubo de aço anulando os possíveis efeitos de condução de calor. A resina epóxi do tubo inox

também o mantinha fixo em sua posição, garantindo a integridade das medidas realizadas pelo sensor.

O tubo de aço inox é introduzido no canal de número 11, dando acesso ao interior do tubo interno. A passagem da solução de glicerina é vedada pelo anel de vedação de borracha, o que permite o movimento radial da sonda. Foi realizado uma montagem que conecta um parafuso micrométrico ao tubo inox:

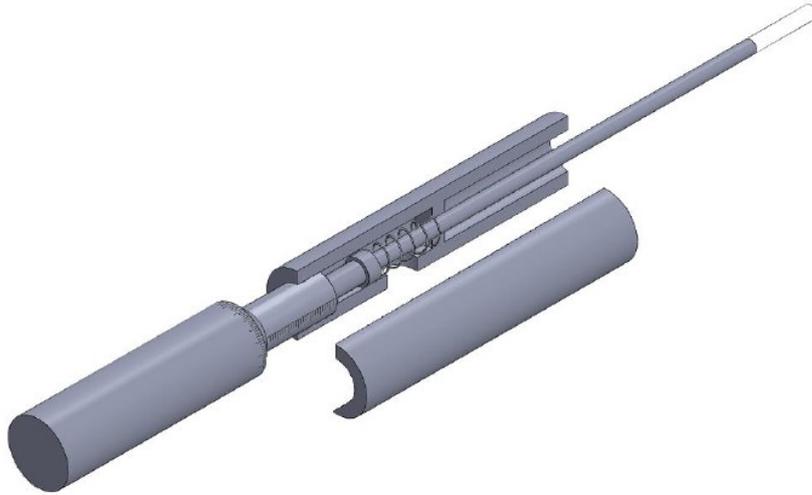


Figura 15 – Sonda termopar

Essa montagem foi realizada com objetivo de permitir os movimentos radiais da sonda de temperatura com resolução de 0,01 mm. Este conjunto é acoplado no canal 11 da Figura 14.

5- RESULTADOS

O fenômeno observado em campo foi computado antes de a glicerina ser trocada pela nova, infelizmente não houve tempo hábil para traçar uma nova curva de perda de carga pela vazão, porém seu comportamento seria muito parecido, apenas teria seu gráfico deslocado para cima, pois as perdas de carga seriam maiores devido ao aumento da viscosidade com o aumento da concentração de glicerina em solução. O gráfico da figura 16 foi elaborado apenas a partir da bomba média que foi suficiente para demonstrar o problema a ser estudado que para perdas de cargas iguais temos vazões diferentes, caso a bomba grande ou a bomba pequena tivessem sido postas nesse gráfico suas curvas seriam lineares visto que no primeiro caso quase não há troca de calor e no segundo caso há uma enorme troca de calor, de modo que vazões intermediárias apresentam um comportamento não linear.

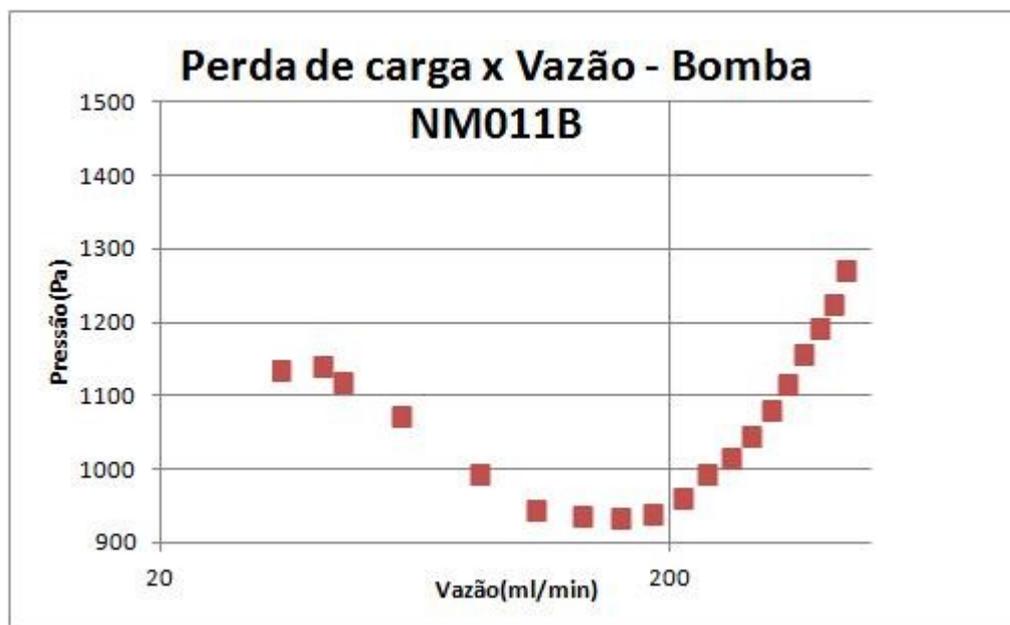


Figura 16 – Gráfico de Perda de carga x Vazão Bomba média

Para o perfil de velocidade axial, calculamos na primeira janela de medição com o sistema isotérmico a temperatura de 27°C para uma vazão volumétrica de 134,08 (ml/min) da bomba média referente à rotação de 500rpm, a fim de achar o centro do tubo interno. Conforme o gráfico da figura 17 abaixo, podemos notar a simetria parabólica esperada para esse escoamento laminar plenamente desenvolvido.

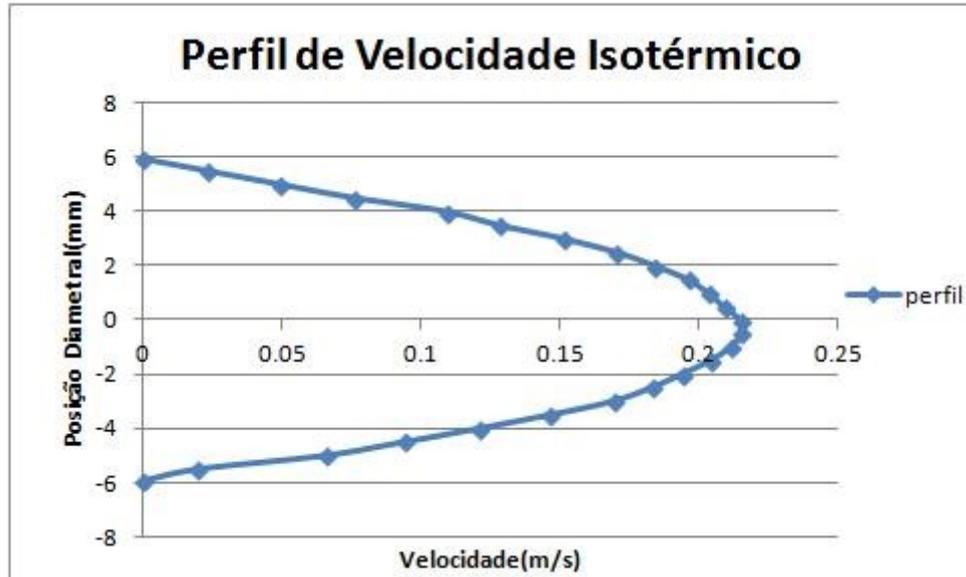


Figura 17 – Gráfico do Perfil de velocidade para condições isotérmicas em $T=27^{\circ}\text{C}$

Através da fixação do centro do tubo utilizamos passes pré-determinados do curso do laser para percorrer toda a extensão diametral do tubo interno na primeira janela de medição, com a bomba grande acoplada ao sistema fizemos um teste com temperatura de trabalho, 70°C no fluido quente e 5°C no fluido frio, para uma rotação de 500rpm. Os resultados podem ser observados na figura 18. E condizem com o esperado uma vez que a velocidade máxima obtida pelo LDV foi de $0,13945\text{m/s}$, que é duas vezes maior que a média, sendo a mesma igual a $0,069725\text{m/s}$. Comparando meu resultado para essa vazão com a Ref. [1] que obteve como média $0,070\text{m/s}$, podemos notar que ambos os valores são muito próximos e dentro da faixa de incertezas de medição.

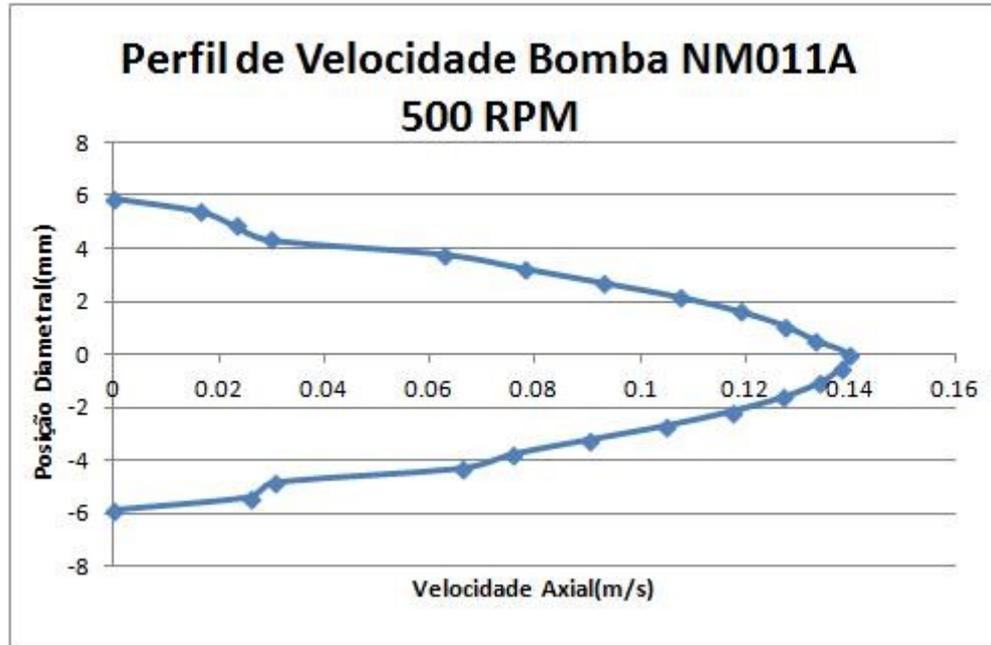


Figura 18 – Perfil de Velocidade Axial para bomba grande a 500 rpm

Para melhor analisar o comportamento do escoamento foi retirado da Ref. [1] gráficos da primeira janela de visualização para perfis radiais de temperatura e axiais de velocidade. Conforme Figuras 19 e 20 temos:

A figura abaixo nos mostra o efeito da convecção natural agindo no escoamento por causa dos gradientes de viscosidade.

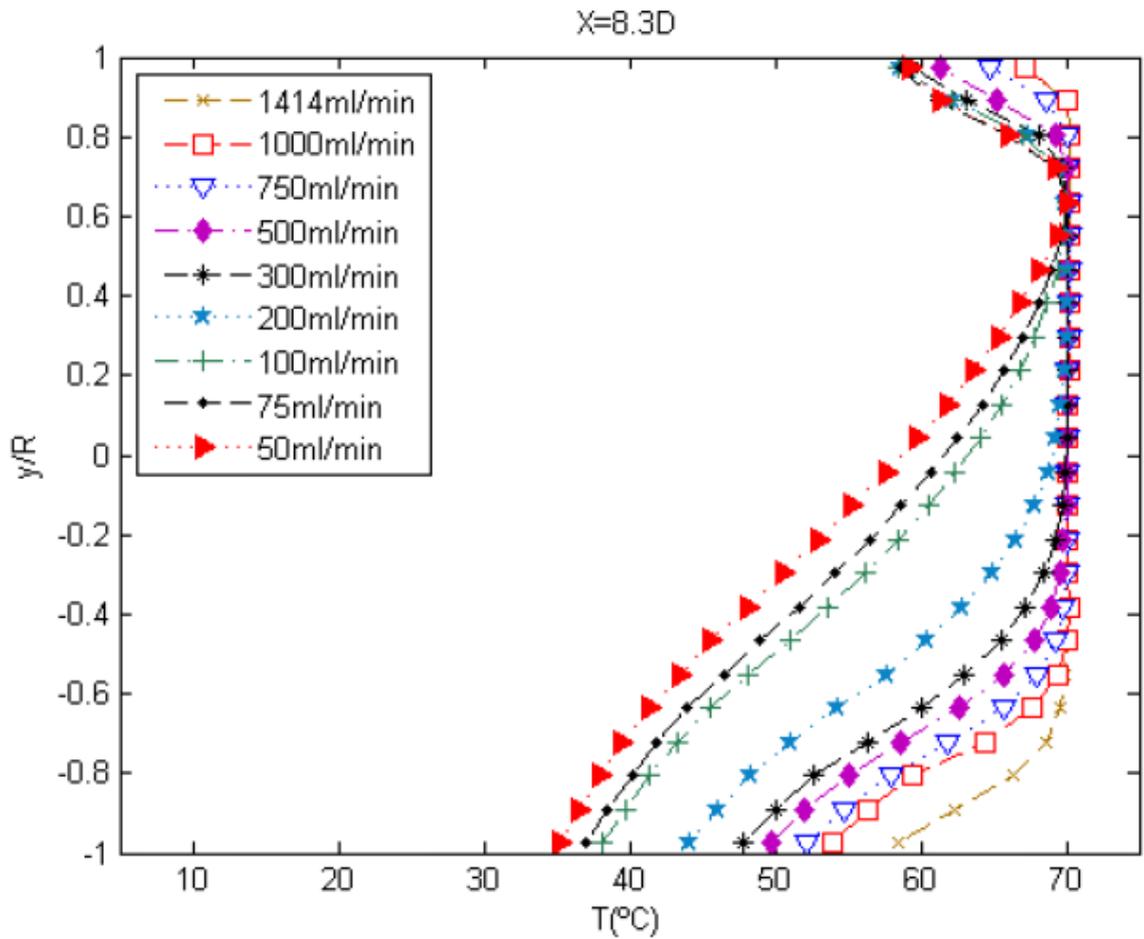


Figura 19 – Perfil Radial de Temperatura obtido pela Ref. [1] na primeira janela de medição

No perfil de velocidade axial é de se esperar que para vazões altas o perfil não se destoe muito de seu comportamento parabólico pois na primeira janela o fluido quente ainda não teve tempo suficiente para trocar calor com o fluido frio, porém para vazões baixas podemos observar que o perfil de velocidade não se comporta como uma parábola, pela convecção natural, devido ao gradiente de viscosidade as velocidades tendem a ser mais altas na parte radial superior que na inferior, jogando a curva para cima.

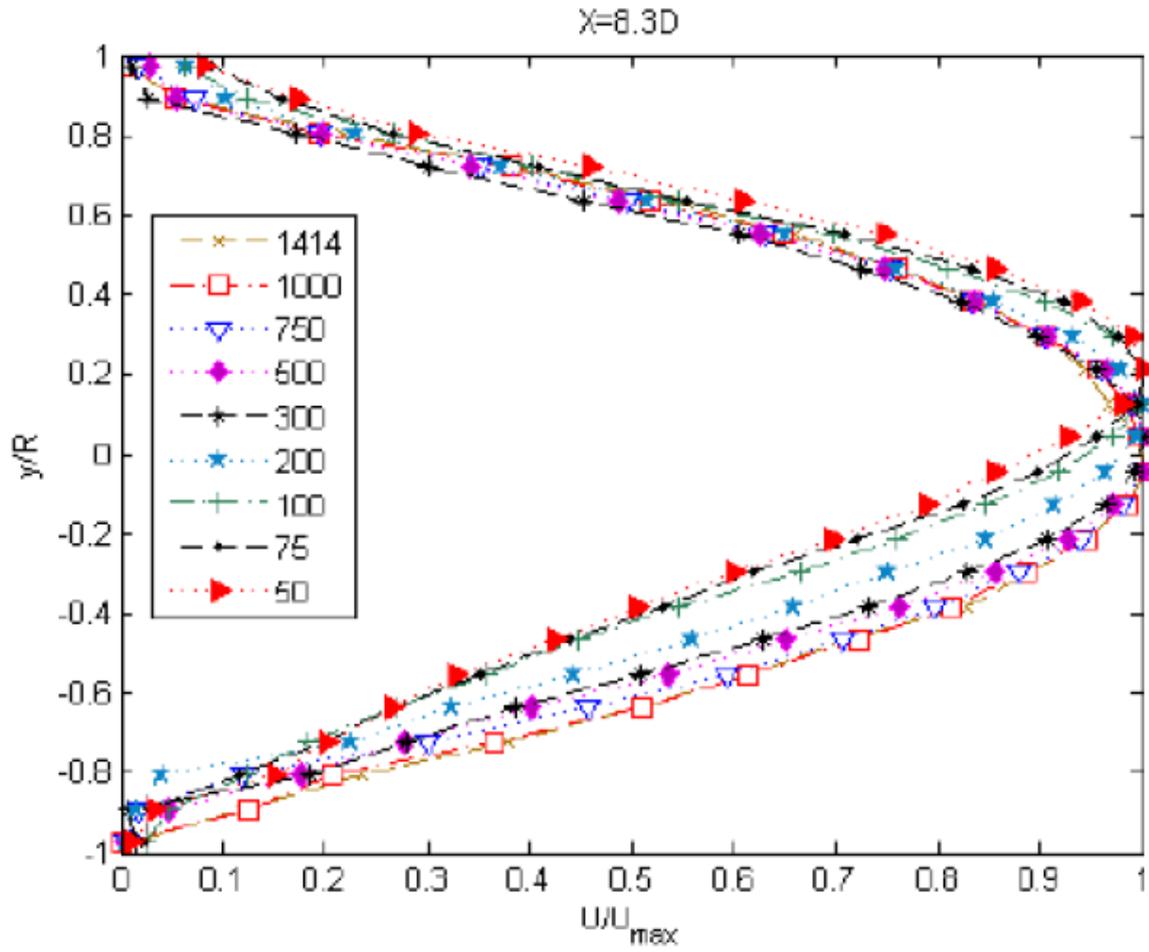


Figura 20 – Perfil Axial de Velocidade obtido pela Ref. [1] na primeira janela de visualização

6- CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivos iniciais a continuação de projetos anteriores, com o intuito de calcular os perfis axiais de velocidade, perfis radiais de temperatura e a observação do gráfico de perda de carga pela vazão, para podermos entender melhor os fenômenos ligados ao escoamento laminar plenamente desenvolvido de óleos pesados que possuam viscosidade dependente da temperatura. Porém devido a atrasos causados pelo vazamento na seção de testes e a demora na obtenção de alguns equipamentos, materiais e dados tornou-se impossível à realização de alguns dos ensaios propostos no escopo do projeto.

Entretanto foi possível instalar a placa de suporte para a base do laser que travou com eficácia o laser na posição de medida, alguns termopares foram consertados e outros no decorrer do experimento acabaram por parar de funcionar.

Foi relatado experimentalmente a falta de linearidade do gráfico de perda de carga versus a vazão para escoamentos com vazões intermediárias, foram caracterizados os fluidos (solução de glicerina antiga e nova) de acordo com sua porcentagem de glicerina em solução de água, todas as curvas de calibração de bombas foram levantadas.

Fica como sugestão para futuros trabalhos a continuação da obtenção de dados de perfil axial de velocidade para as três janelas de visualização e para diferentes vazões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] - Bessa, G. “Estudo Experimental do Escoamento Laminar em Dutos de Óleos Pesados com Viscosidade Dependente da Temperatura.” Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2013.

[2] - Torres, P. C. “Estudo Experimental do Escoamento Laminar em Dutos de Óleos Pesados com Viscosidade Dependente da Temperatura.” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2013.

[3] - Chalhub, R. “Estudo Experimental do Escoamento Laminar em Dutos de Óleos Pesados com Viscosidade Dependente da Temperatura.” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, Dezembro de 2016.

[4] - Ockendon, H. & Ockendon, J. R. "Variable-viscosity flows in heated and cooled channels." *J. Fluid Mech.* 83, 177, 1977.

[5] - Richardson, S. M. “Injection molding of thermoplastics: Freezing of variable – viscosity fluids. II. Developing flows with very low heat generation.” *RheolActa* 25: 308 – 318, 1986.

[6] - Whitehead, J. A & Helfrich, K. R. "Instability of flow with temperature dependent viscosity: A model of magma dynamics." *J. Geophys. Res.* 96, 4145, 1991.

[7] - Helfrich, K. R. “Thermo-viscous fingering of flow in a thin gap: A model of magma flow in dikes and fissures.” *Journal of Fluid Mechanics*, 305, 219 – 238, 1995.

[8] - Wylie, J. J. & Lister, J. R. “The effects of temperature-dependent viscosity on flow in a cooled channel with application to basaltic fissure eruptions.” *Journal of Fluid Mechanics*, 305, 239 – 261, 1995.

[9] - Giessler, C.; Lange, U. & Thess, A. “Nonlinear laminar pipe flow of fluids with strongly temperature-dependent material properties.” *Physics of Fluids*, 19, 2007.

[10] - Quinones, D. M. & Carvalho, M. S. "Pipeline flow of heavy oil with temperature dependent viscosity." 13th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Uberlândia, MG, 2010.

[10] - Nieckele, A. O., Azevedo L. F. A., Carvalho, M. S. "Análise teórica e experimental do escoamento laminar em dutos de óleos pesados com viscosidade dependente da temperatura". 3º Relatório de Acompanhamento de Projeto, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, Fevereiro de 2012.

[11] - Kline, S. J., & McClintock, F. A. "Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments", Mech. Eng., p.3-8, 1953.

[12] - Glycerine Producer's Association. "Physical Properties of Glycerine and Its Solutions", 1963.

[13] - Madison L. Sheely, Armour Soap Works. "Glycerol Viscosity Tables" - Chicago

[14] - <http://lef.mec.puc-rio.br/wp-content/uploads/2015/03/An%C3%A1lise-de-incertezas.pdf>

APÊNDICES

A.1 – Calibração das Bombas

Todo o procedimento utilizado para a calibração das bombas foi isotérmico, utilizando temperatura do banho térmico quente e do banho frio a 25°C a solução era pesada e posteriormente sua temperatura era medida e sua média foi de 24,5°C, utilizei para o levantamento das curvas a glicerina degradada que estava na seção. Primeiro foi necessário fechar a válvula de alimentação do reservatório e abrir a válvula secundária que estava conectada a uma mangueira livre, a partir da rotação imposta no inversor de frequência das bombas de cavidade progressiva foi calculado o tempo, com um cronômetro, necessário para encher dois copos plásticos de 300 ml até certo nível, os mesmos foram pesados em uma balança de precisão modelo A200 enquanto estavam vazios e após estarem cheios tendo sua massa inicial descontada. Essas medidas me retornaram três gráficos lineares de rotação da bomba (RPM) versus vazão mássica (g/s) referente as três bombas. Uma amostra da solução foi coletada e entregue para a obtenção da densidade pelo laboratório da PUC-Rio, porém por contratempos ficou impossibilitado o resultado no tempo hábil do projeto, portanto para a caracterização do fluido foi utilizado um viscosímetro VR 3000 MYR conforme figura 21, que a temperatura de 25°C obteve uma viscosidade de 107cp para a amostra. Com esse dado em mãos através da interpolação de valores de porcentagem de água em solução de glicerina pela Tabela VII da Ref. [13], obtive aproximadamente uma solução de 87% de glicerina com 13% de água, resultado esperado visto que a glicerina tende a absorver a umidade do ar. Portanto para fins de cálculo da massa específica da solução pela Tabela 1 da Ref. [12], obtive um valor de 1.2279 kg/m³.



Figura 21 - Viscosímetro MYR 3000

Tabela 1 – Calibração Bomba NM011A

Bomba NM011A								
Motor (rpm)	Peso (g)	Peso (g)	Peso Glicerina (g)	Tempo (s)	Vazão (g/s)	T (°C)	Peso cp1 (g)	Pesco cp2 (g)
500	151.35	157.82	304.59	37.07	8.216617211	24.5	2.26	2.32
600	164.81	154.47	314.66	32.29	9.744812635	24.5	2.14	2.48
700	168.11	152.38	315.61	27.87	11.32436311	24.5	2.59	2.29
800	170.73	191.08	357.11	27.76	12.86419308	24.5	2.54	2.16
900	161.34	189.14	345.98	24.06	14.37988362	24.5	2.21	2.29
1000	180.68	160.7	336.71	21.04	16.003327	24.5	2.31	2.36
1100	195.01	161.23	351.73	20.2	17.41237624	24.5	2.42	2.09
1200	176.86	188.72	361.09	18.87	19.13566508	24.5	2.11	2.38
1300	168.45	183.76	347.77	16.91	20.56593732	24.5	2.18	2.26
1400	169.18	192.06	356.72	16.06	22.2117061	24.5	2.34	2.18
1500	184.65	189.49	369.62	15.54	23.78507079	24.5	2.35	2.17

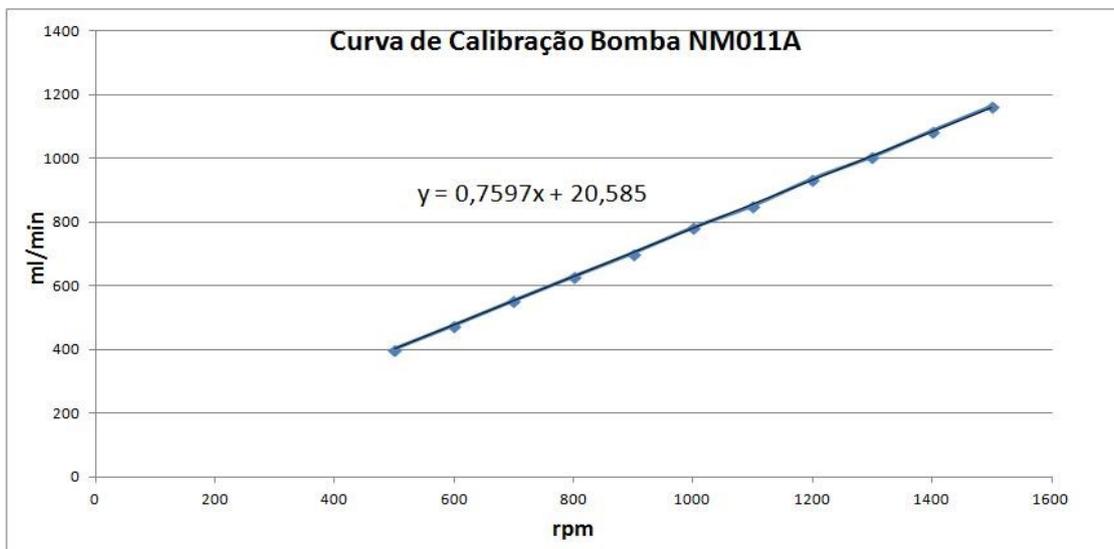


Figura 22 - Curva de Calibração Bomba Grande

Tabela 2 - Calibração Bomba NM011B

BOMBA NM011B									
Motor (rpm)	Peso (g)	Peso (g)	Peso Glicerina (g)	Tempo (s)	Vazão (g/s)	T°C	Peso cp1	Pesco cp2	
100	142.82	154.75	292.99	417.44	0.701873323	24.5	2.44	2.14	
200	164.84	161.88	322.08	266.78	1.207286903	24.5	2.11	2.53	
300	162.43	152.28	310.14	180.69	1.716420389	24.5	2.23	2.34	
400	156.08	153.8	305.36	137.05	2.228091937	24.5	2.31	2.21	
500	152.6	165.04	312.92	114.04	2.743949491	24.5	2.35	2.37	
600	173.12	179.73	348.12	106.57	3.266585343	24.5	2.35	2.38	
700	162.68	166.34	324.08	85.49	3.790852731	24.5	2.39	2.55	
800	160.46	151	306.81	71.03	4.319442489	24.5	2.4	2.25	
900	165.99	142.7	303.96	62.65	4.851715882	24.5	2.5	2.23	
1000	168.67	151.78	315.76	58.66	5.382884419	24.5	2.33	2.36	
1100	150.1	166.27	311.87	52.77	5.909986735	24.5	2.28	2.22	
1200	163.69	165.94	325.02	50.42	6.446251488	24.5	2.34	2.27	
1300	176.69	148.93	321	46.11	6.961613533	24.5	2.25	2.37	
1400	167.25	163.01	325.59	43.35	7.510726644	24.5	2.34	2.33	
1500	160.74	164.4	320.64	39.95	8.026032541	24.5	2.17	2.33	
1600	164.23	172.04	331.77	38.76	8.559597523	24.5	2.39	2.11	
1700	171.82	170.66	337.82	37.18	9.086067778	24.5	2.45	2.21	

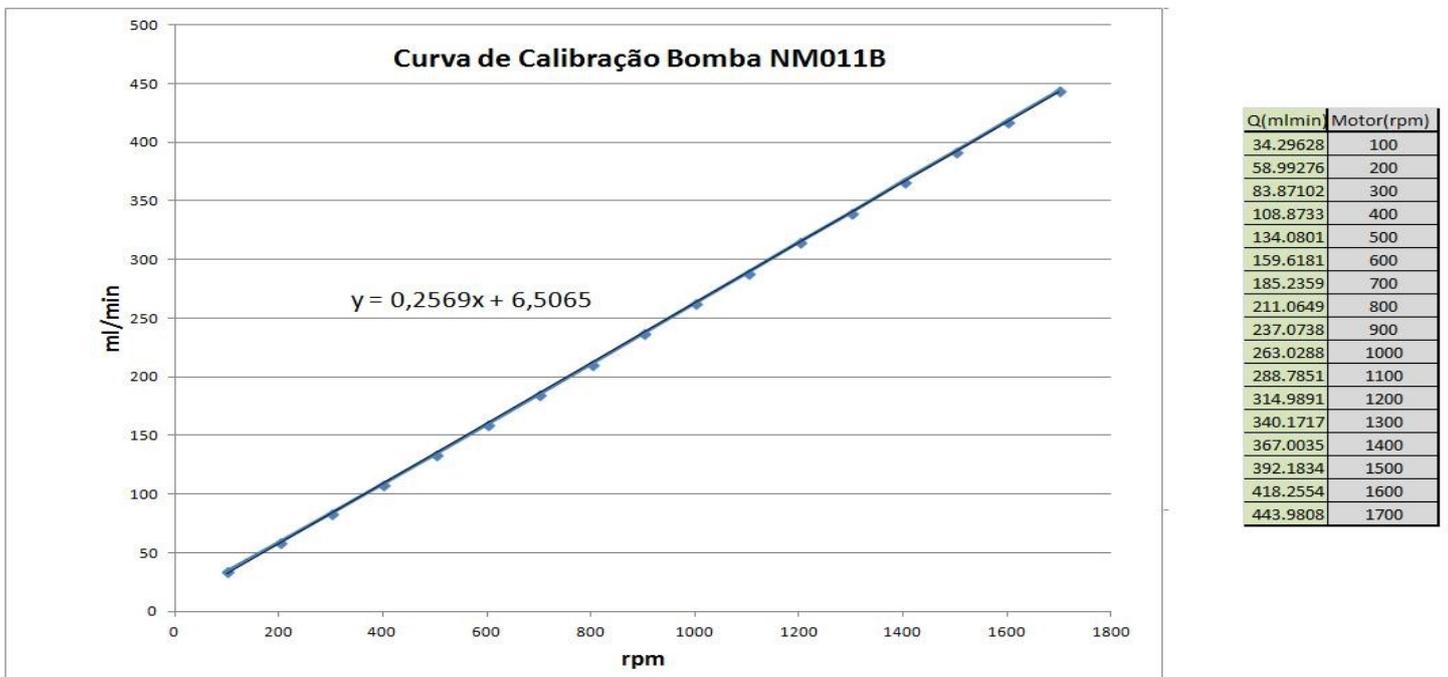


Figura 23 - Curva Calibração Bomba Média

Tabela 3 - Calibração Bomba 4N02

Bomba 4N02									
Motor (rpm)	Peso (g)	Peso (g)	Peso Glicerina (g)	Tempo (s)	Vazão (g/s)	T ^o	Peso cp1	Pesco cp2	
200	26.27	97.02	118.77	484.01	0.245387492	24.5	2.26	2.26	
400	84.73	100.33	180.6	386.16	0.46768179	24.5	2.31	2.15	
600	54.05	116.31	165.88	241.86	0.685851319	24.5	2.18	2.3	
800	105.1	124.35	224.73	249.13	0.902059166	24.5	2.41	2.31	
1000	139.01	97.5	232.08	207.43	1.11883527	24.5	2.22	2.21	
1200	122.96	122.11	240.62	180.36	1.334109559	24.5	2.17	2.28	

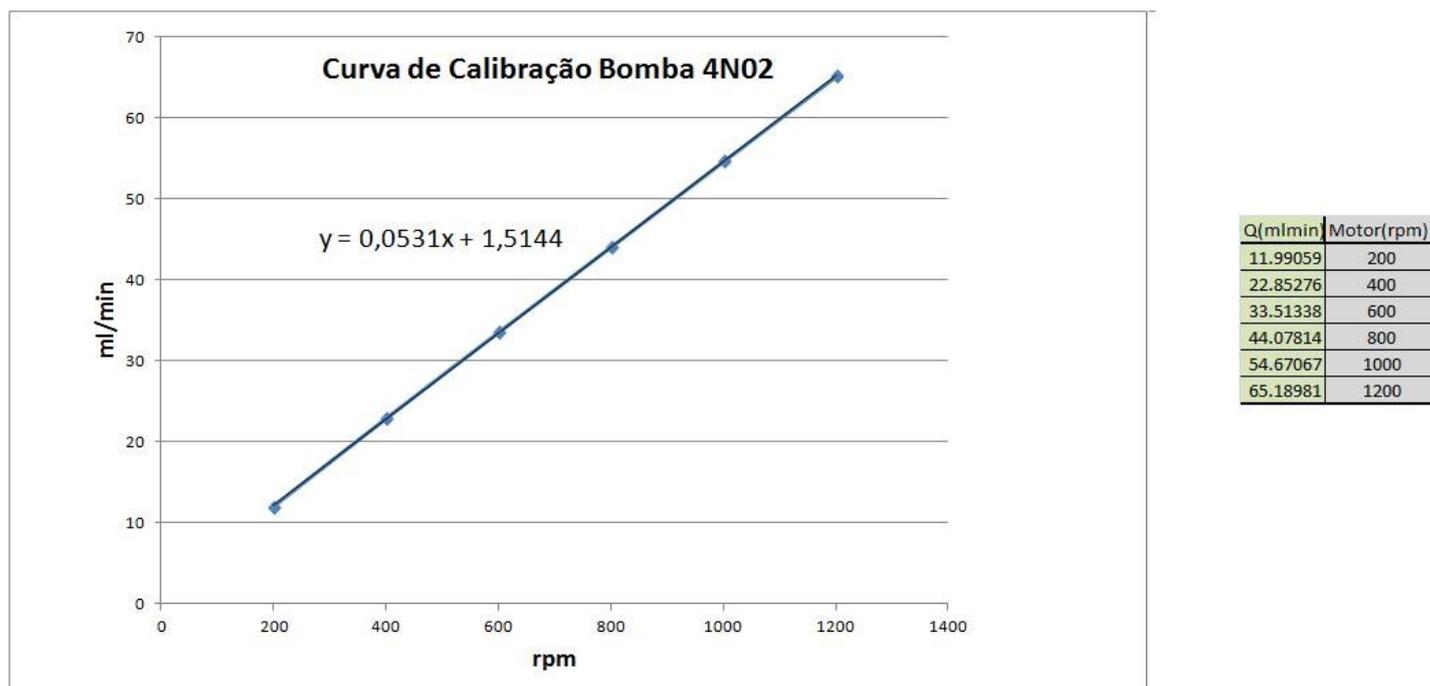


Figura 24 - Curva de Calibração Bomba Pequena

A.2- Caracterização do fluido de trabalho

A primeira parte dos ensaios para a validação da seção, como já comentado antes, foi feita utilizando uma glicerina degradada, suas propriedades foram obtidas através de medidas de viscosidade pelo viscosímetro VR 3000 MYR que a uma temperatura de 25°C forneceu uma viscosidade de 107cp, em seguida através das tabelas das Ref. [12] e Ref. [13], esse valor foi devidamente interpolado para chegar a um valor de 87% de glicerina e 13 %de água em solução, com densidade de 1.2279 g/ml. Após o descarte da glicerina degradada, foi preparada a nova mistura água + glicerina contendo 15 litros, sendo desses 14,25 litros de glicerina e 0,75 litros de água destilada fornecendo uma solução de 95% de glicerina com 5% de água. A solução de trabalho foi caracterizada novamente através de tabelas das Ref. [12] e Ref. [13],

depois da obtenção de medidas da viscosidade pelo mesmo viscosímetro a temperatura de 25°C e 70°C, os valores obtidos foram 188,60cp e 23,05cp respectivamente, o percentual do fluido de trabalho ficou, portanto em 94% glicerina e 6% água. Também foi calculado o índice de refração da solução com valor de 1,459, através do refratômetro pertencente ao laboratório de mecânica dos fluidos da PUC-Rio, para fins de cálculo de passe no interior das janelas de visualização uma vez que os diferentes meios alteram a distância focal do probe.

A.3– Análise de Incertezas do Projeto

O cálculo de incertezas já havia sido obtido nos projetos anteriores, Ref. [1], Ref. [2] e Ref. [3], que através do método de propagação de incertezas de Kline & McClintock (1953) estimou a incerteza das grandezas dependentes das outras a partir da propagação da mesma. As incertezas individuais se dividem em Tipo A e Tipo B, de acordo com a Ref. [14], a primeira é obtida através de um conjunto de amostras utilizando estimadores amostrais para a média e desvio padrão e a segunda é obtida mediante a informações dos equipamentos fornecidas pelos fabricantes como por exemplo a resolução do equipamento.

Temos da Ref. [2] as incertezas tabeladas abaixo:

Tabela 4 - Incertezas

Grandeza	Incerteza	Unidade
Variação de Pressão	0,5	%
Diâmetro	0,05	mm
Variação do Tempo	0,5	S
Comprimento da Tubulação	0,5	mm
Variação de Massa	0,01	mg
Variação de Volume	2,00E-03	ml
Massa Específica	5,00E-05	kg/ ml

E através das Ref. [1], Ref.[2] e Ref. [3] temos que para o medidor de pressão Zurich com 95,4% de confiabilidade uma incerteza do tipo A de aproximadamente $\pm 0,5\%$ e para os termopares para 95% de confiabilidade apresentaram incerteza menor que $0,3^{\circ}\text{C}$.

A.4– Validação da seção de testes

Para a validação da seção um ensaio isotérmico a 25°C foi feito com o objetivo de comparar valores da perda de carga lidos no medidor de pressão com a perda de carga analítica fornecida pela equação derivada de Navier-Stokes, a perda de carga é governada pela dissipação viscosa visto que a seção é um tubo reto e liso sem restrições ou válvulas entre as duas tomadas de pressão. A leitura da pressão se dá através do sinal que o Zurich manda para o Agilent que vem em Volts. Sabendo que o fundo de escala do medidor de pressão a $0\text{ mmH}_2\text{O}$ é 4 Miliampère e a $1000\text{ mmH}_2\text{O}$ é 20 Miliampère e tendo a resistência interna do Zurich de 261 Ohms obtive através de interpolações todas as pressões em mmH_2O e posteriormente foram transformadas em Pascal.

Os valores usados são referentes a glicerina degradada e para a perda de carga analítica foram:

- Diâmetro interno: $11,8\text{mm}$
- Comprimento: $2,84\text{m}$
- Viscosidade: 107cp
- Vazões: seis medidas conforme Tabela abaixo em m^3/s

$$\Delta P_{teórico} = \frac{128Q\mu_{ref}L}{\pi D^4}$$

As medições foram satisfatórias e estão dentro da incerteza experimental.

Tabela 5 – Perda de carga analítica vs medida Bomba Média

Motor (rpm)	Q(ml/min)	Vazão (m ³ /s)	Voltagem Zurich	Pressao (mmH2O)	Pressao(Pa)	Pressão Analítica(Pa)	Erro
300	83.87101825	1.39785E-06	1.4208	90.22988506	884.8529023	892.6780391	0.876591161
400	108.8732928	1.81455E-06	1.5335	117.217433	1149.510339	1158.788811	0.800704341
900	237.0738276	3.95123E-06	2.133	260.7758621	2557.337608	2523.286398	-1.349478591
1000	263.0288013	4.38381E-06	2.2555	290.1101533	2845.008734	2799.537188	-1.624252282
1600	418.2554372	6.97092E-06	2.9842	464.6072797	4556.240979	4451.686069	-2.348658657
1700	443.9808345	7.39968E-06	3.1108	494.9233716	4853.540283	4725.493371	-2.709704611