

### 3 Metodologia Experimental

Neste capítulo será descrito o desenvolvimento e construção da bancada experimental (Figura 3.1). Além disso, serão apresentados os resultados das duas etapas de validação da bancada. A primeira etapa realiza-se a fim de avaliar o funcionamento da bancada com fluidos newtonianos, e a segunda, com o objetivo de comprovar a ocorrência de deslizamento na parede do tubo no escoamento com fluido viscoplástico.

Para tanto, foram construídas e testadas duas plantas experimentais antes da bancada apresentada neste capítulo. Na primeira delas, os resultados obtidos da validação realizada com fluido Newtoniano não concordaram com os dados teóricos, e os resultados dos testes feitos para avaliar o deslizamento na segunda bancada mostraram deslizamento no escoamento. Os trabalhos, testes e opções consideradas para eliminar o deslizamento na parede do tubo são mostrados no anexo B.



Figura 3.1: Foto Bancada Experimental

### 3.1

#### Montagem experimental

A planta experimental 3.2 é composta por de uma unidade de manutenção, uma válvula ITV, duas válvulas de multiseleção, três reservatórios, um reservatório para descarte, uma seção de testes, um banho maria para controle de temperatura, um transdutor de pressão diferencial, uma balança científica e um computador. A seção de testes é composta por um tubo PVC de 2 polegadas de diâmetro, um tubo de resina, 2 tampões.

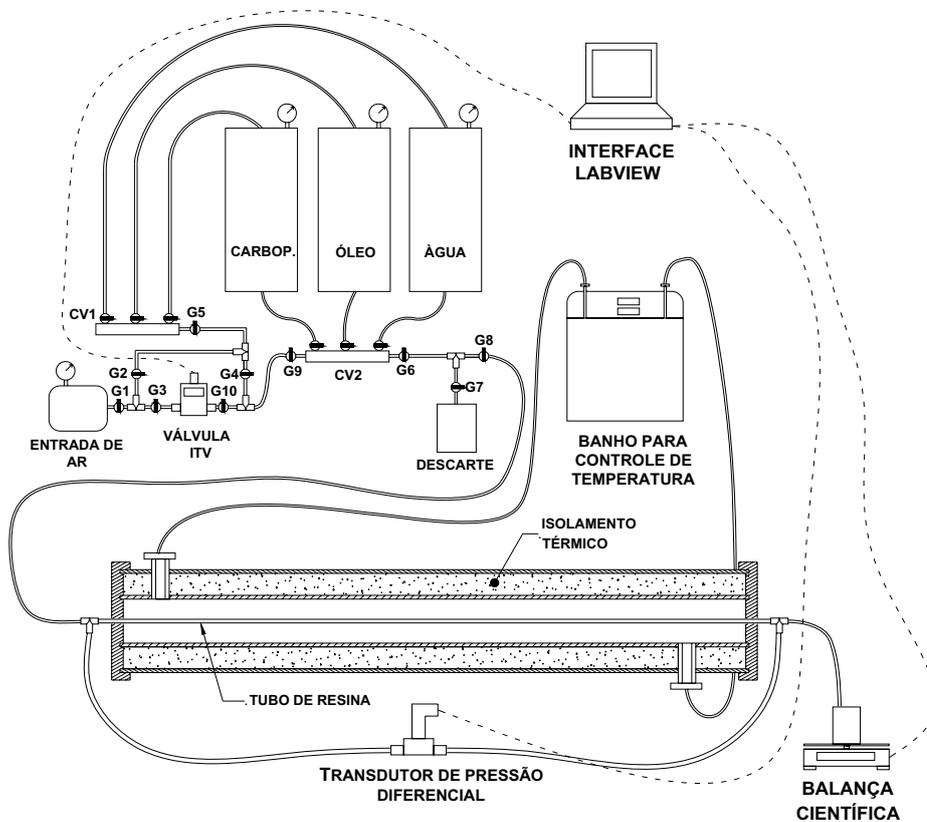


Figura 3.2: Desenho esquemático da planta experimental

#### 3.1.1

## Reservatórios

A bancada tem três reservatórios cilíndricos feitos em acrílico (Figura 3.3) com capacidade de 16 litros de fluido cada um. Os fluidos circulam pelo experimento através de mangueiras de plástico até a entrada do tubo de resina. Cada reservatório tem uma entrada para a mangueira com ar comprimido e uma saída para a mangueira com o fluido de trabalho.

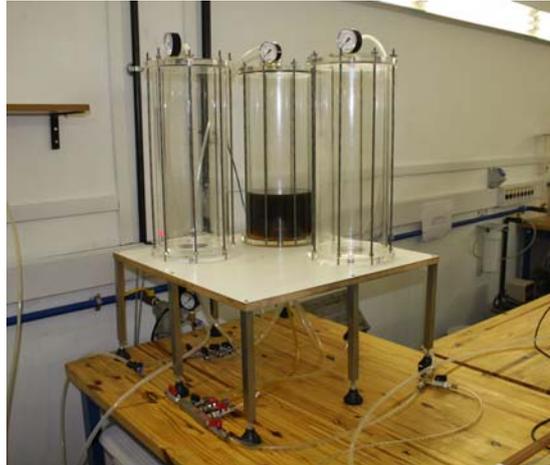


Figura 3.3: Contenedores

### 3.1.2

#### Válvulas de controle do circuito

A válvula ITV-2050 (transdutor proporcional de pressão) marca SMC tem uma faixa de medição de 0-2bar, e é responsável por controlar a vazão de deslocamento do circuito hidráulico. Depois de ser regulado, o ar é distribuído com ajuda do comando de válvula CV1, como pode ser visto na Fig. 3.2 responsável pelo controle da pressurização do reservatório desejado. Cada reservatório está equipado com um manômetro para monitorar a respectiva pressão. O comando de válvulas CV2 é responsável por controlar o fluxo de saída do fluido desejado, e segue pela mangueira até o tubo de resina.

### 3.1.3

#### Seção de testes

A seção de testes foi fabricada com resina poliéster isoftálica (ver Fig.3.4), ou seja, resina sem acelerar o que facilita o preparo da mistura, dependendo da temperatura ambiente, do tempo de cura desejado (ver anexo B). A composição da resina consiste em: 0,5% de acelerador (Cobalto) e 1,2% de catalizador para um tempo de cura de 40 minutos aproximadamente e 25°C. O molde utilizado

é um tubo de PVC próprio para altas temperaturas, por causa da reação exotérmica na secagem da resina o que ocasiona no tubo PVC tradicional uma flexão e conseqüentemente uma deformação na amostra final, e que tem um comprimento de 200mm.

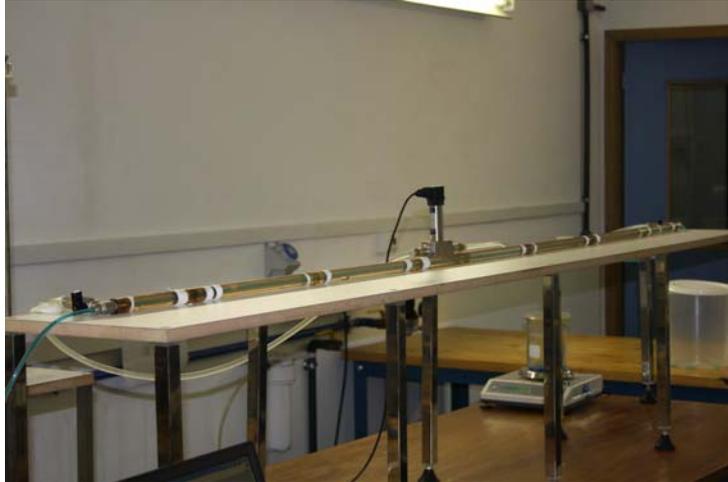


Figura 3.4: Tubo fabricado com resina polyester.

Colocou-se no centro do tubo uma barra roscada de 3/16" a fim de obter uma superfície interna do tubo com a geometria da rosca, simulando uma rugosidade e eliminando assim os efeitos de deslizamento durante o escoamento dos fluidos. No tubo foram colocados tampões nos extremos (Fig.3.5) que além de servir para fechar o tubo, tem a função de centralizar a barra roscada e permitir o giro desta durante o período de secagem, para evitar que se cole com a resina.

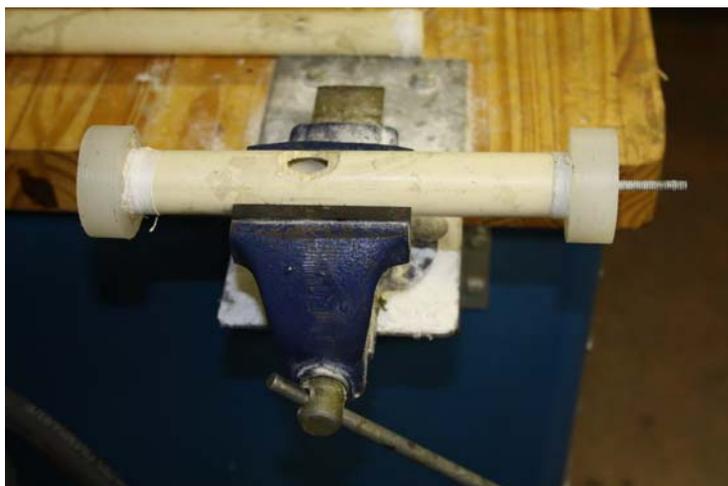


Figura 3.5: Montagem tubo PVCP, tampas e barra roscada

A resina é despejada dentro do tubo, e a partir de 10 minutos, tempo no qual começa a curar, a barra roscada é girada a cada 5 minutos. Ao final

do processo obtém-se uma barra de resina com um furo roscado no centro. Uma vez finalizado o tempo de secagem das amostras, colaram-se os tubos em pares (fig.3.6). Para tanto, dois tubos foram colocados em um tubo PVC, distanciadas uma da outra por 20mm. A seguir, foi preenchido com resina o espaço entre as amostras, obtendo-se a união dos tubos.

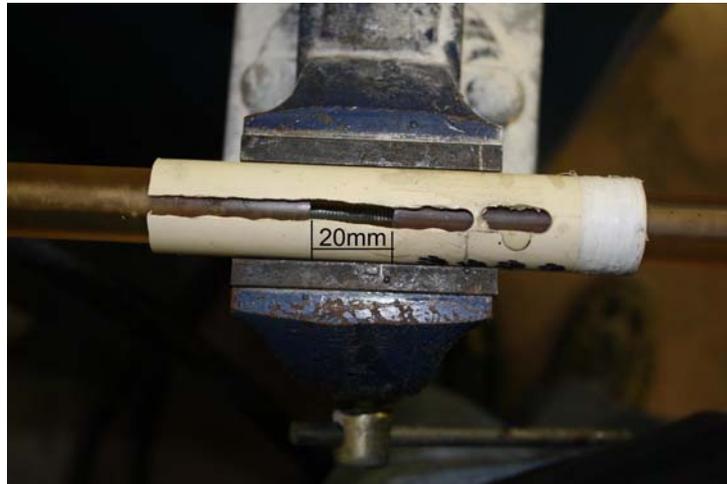


Figura 3.6: Montagem união de seções de tubo

As dimensões do tubo de resina foram definidas utilizando a eq.2-6. Foram feitas iterações dos valores de  $\tau_0$  (tensão limite de escoamento do fluido utilizado), o L (comprimento do tubo) e o R (raio do tubo) até um valor de pressão deferencial ( $\Delta P$ ) na faixa de 0-14,5 Psi. Além disso, o comprimento do tubo não poderia ultrapassar 2 metros em função de restrições de espaço no laboratório. Os valores das variáveis iniciais são mostrados na Tabela 3.1.

$\tau_0$ [Pa]	25
Comprimento [m]	2
Raio interno [m]	0,004
$\Delta P$ [Pa]	56250
[Psi]	8,15

Tabela 3.1: Valores das variáveis iniciais.

Para a entrada e saída do fluido foram usinadas duas peças (Fig.3.7) com rosca 3/16" e no outro extremo com rosca de 10mm para colocar a conexão em T na saída e na entrada como se pode observar na Fig.3.7. A conexão entre a saída do tubo e a balança foi feita com mangueira de plástico. Finalmente, o comprimento total do tubo é de de 2,25m e com raio de 0,004224m.

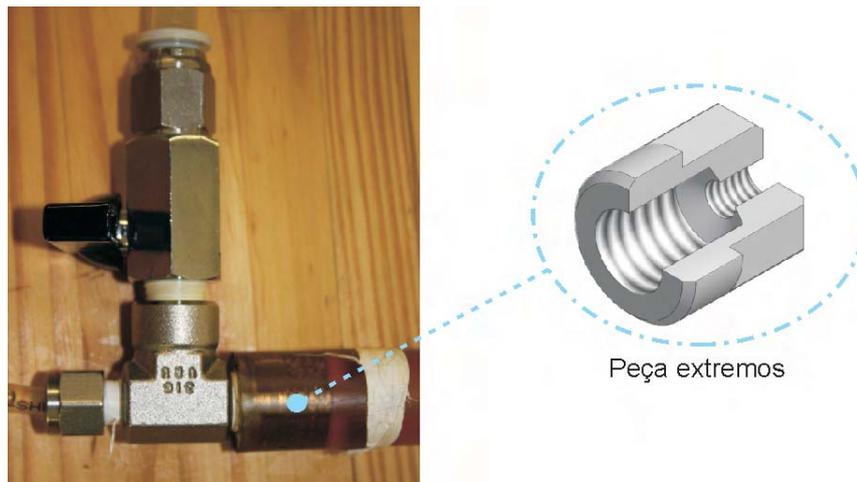


Figura 3.7: Conexão de extremos do tubo de resina.

### 3.1.4

#### **Banho para controle de temperatura (proposta para trabalhos futuros).**

Para manter a temperatura constante principalmente nos testes com óleos, o tubo de resina será colocado dentro de um tubo PVC de 3" de diâmetro, com tampões nos extremos como podê-se observar na Fig.3.2. Em um extremo será instalada uma mangueira para a entrada da água que vem do banho de controle de temperatura, e no outro a saída da água para o retorno ao banho (circuito fechado). O banho maria (marca Nova Ética) modelo 521/3DE tem uma vazão de 10L/min e pressão de  $0,5 \text{ Kgf/cm}^2$ .

Devido ao fato de que o carbopol não é muito sensível à temperatura, o trocador de calor não foi utilizado nos testes realizados neste trabalho. Entretanto, a temperatura do fluido newtoniano foi verificada com um termômetro colocado dentro do reservatório.

### 3.1.5

#### **Transdutor e LabView**

Foi instalado um transdutor de pressão diferencial WTDP-4010 (marca Warme), entre a entrada e a saída do tubo. Ele possui uma faixa de medição de 0 – 1bar diferencial e até 3bar de pressão estática, e é responsável por coletar a queda de pressão. Esses dados de voltagem são enviados para o computador onde através da equação da curva de calibração (Fig. 3.8) é feita uma conversão para pressão.

Foi projetada e construída uma placa eletrônica que recebe os sinais de voltagem da válvula ITV, do transdutor de pressão e da balança científica. A placa envia os sinais em voltagem para a interface Labview no computador. A interface, mediante equações de calibração dos componentes da bancada

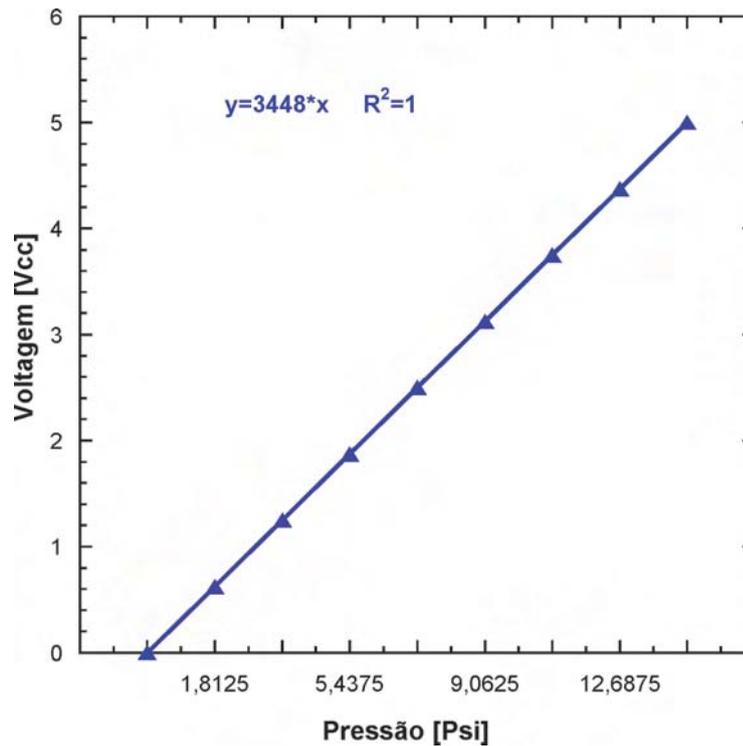


Figura 3.8: Calibração Transdutor de Pressão.

configuradas pelo operador, faz a conversão dos dados de voltagem (Volts) para unidades comuns de pressão e massa, o que permite a manipulação dos dados, além de permitir controlar o funcionamento da válvula ITV desde o computador.

Esta opção de controle da ITV permite programar a entrada de ar em 3 formas diferentes, como podê-se observar na Fig.3.9.

– **Rampa com controle de massa (ver fig. 3.9a).**

Nesta opção os dados de entrada requeridos para o funcionamento do teste são: a inclinação da entrada de pressão em *bar/s* e a pressão máxima (opcional). A pressão neste teste vai incrementando com o ângulo ( $\theta$ ). A pressão segue aumetando até que ocorra deslocamento de massa sendo percebido pela balança, neste ponto, a pressão mantém-se constante até o fim do teste.

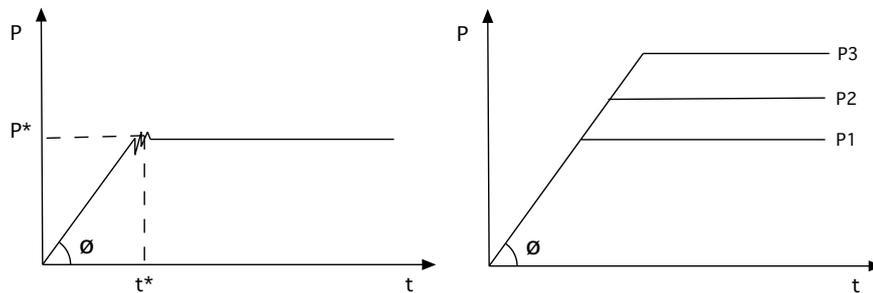
– **Rampa sem controle de massa (ver fig. 3.9b).**

Neste caso, a interface precisa dos mesmos dados de entrada, mas neste teste, a pressão máxima não é opcional, já que, esta será o ponto no qual a pressão deixa de aumentar e começa ser constante até o fim do teste.

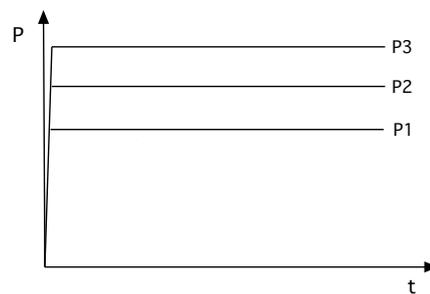
– **Degrau (ver fig. 3.9c).**

O teste de degrau permite avaliar o comportamento do fluido com

a entrada de uma de pressão súbita no sistema. O dado de entrada necessário neste teste é somente a pressão de teste.



3.9(a): Rampa com controle de massa 3.9(b): Rampa sem controle de massa



3.9(c): Degrau

Figura 3.9: Opções operação válvula ITV

Durante os testes aparecem na tela do computador 3 curvas em tempo real. A primeira delas descreve o comportamento da pressão da válvula ITV. A segunda a pressão no transdutor de pressão e a terceira apresenta a evolução temporal de massa.

## 3.2

### Validação da Bancada

O procedimento desenvolvido para estas validações começa com preenchimento do reservatório com os fluidos. O LabView é ligado para obter os dados da balança e do transdutor de pressão. Devido ao fato de que o transdutor de pressão envia sinais a cada 0,001 segundo e a balança a cada 1 segundo, foi necessário uma sincronização das sinais no LabView. Assim, os valores foram enviados ao computador a cada segundo do teste em uma planilha excel.

A seqüência de passos para realizar os testes é:

- Fechar a válvula CV2.
- Abrir a válvula CV1
- Abrir a entrada de ar.
- Ligar a placa eletrônica e labView.

- Ligar a Balança científica.
- Iniciar a leitura do LabView.
- Abrir a válvula CV2.
- Desligar a leitura do LabView.
- Fechar a válvula CV2.
- Zerar a Balança.

### 3.2.1

#### Validação com fluido newtoniano

Os testes de validação consistiram no deslocamento de óleo marca Lubrax GL5 140 pelo circuito hidráulico, através da obtenção de dados de deslocamento de massa e queda de pressão ao longo do tubo que apresenta comportamento newtoniano. A viscosidade deste permite manter o número de Reynolds baixo ( $Re \leq 1$ ) com pressões na faixa de 0-1bar. Assim, realizou-se a validação através da comparação do diferencial de pressão obtida experimentalmente com o diferencial calculado com a equação 2-5.

As propriedades do óleo Lubrax foram obtidas no Laboratório de Caracterização de Fluidos (LCF) da PUC-Rio, através do viscosímetro Cannon Feske, conforme a Tab. 3.2:

Densidade [ $kg/m^3$ ]	Viscosidade [ $Pa.s$ ]
905,4	0,5635

Tabela 3.2: Propriedades Físicas Óleo Lubrax GL5-140 ( $25^\circ C$ )

Substituindo  $\Delta P$  na equação 2-5 obtém-se:

$$\Delta P = \frac{8\mu LQ}{\pi R^4} \quad (3-1)$$

Sendo Q a vazão é calculada através da balança em [ $m^3/s$ ], L o comprimento do tubo (2,25m) e R o raio (0,004224m).

O gráfico 3.10 apresenta os resultados da comparação dos dados obtidos com a equação 3-1 e os valores experimentais. Foram feitos 42 testes com pressões desde 3Psi até 13,5 Psi. Os pontos vermelhos são os valores experimentais e a linha azul representa os dados teóricos com incertezas. O análise de incerteza encontra-se detalhado no anexo D. Os pontos experimentais encontram-se na faixa de incerteza dos valores teóricos, assim pode-se concluir que o aparato experimental está de acordo com a equação 3-1.

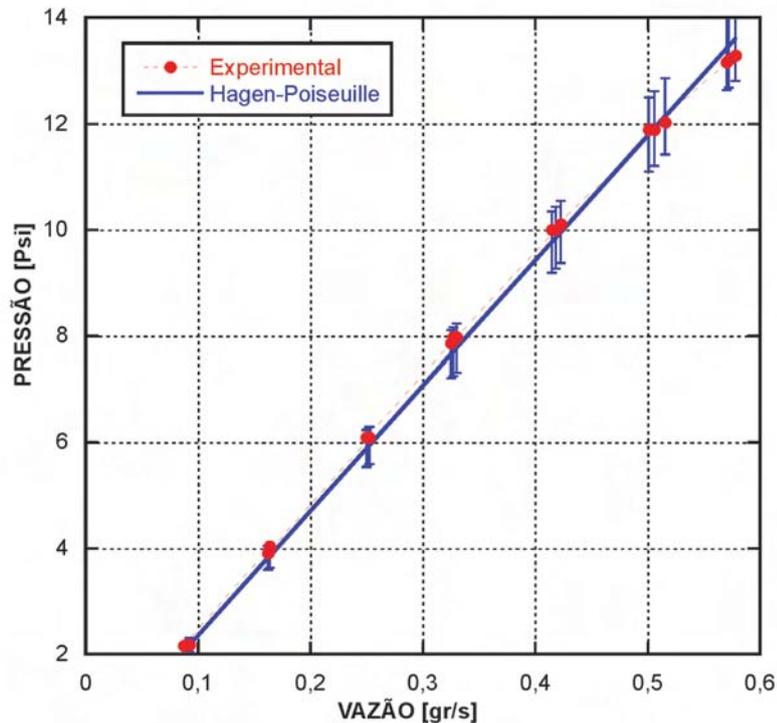


Figura 3.10: Validação bancada experimental com equação de Hagen-Poiseuille

### 3.2.2

#### Avaliação de deslizamento com fluido não newtoniano

Foram feitos testes de validação da bancada através do deslocamento de um fluido não newtoniano com o objetivo de verificar a ocorrência de deslizamento no tubo. O fluido utilizado nestes testes foi uma solução aquosa de Carbopol.

Inicialmente a concentração utilizada de Carbopol foi de 0,3% que possui uma tensão limite de escoamento ( $\tau_0$ ) de 44 Pa, mas pela restrição imposta pela geometria interna da parede do tubo, a pressão máxima de trabalho da bancada não foi suficiente para escoar o fluido.

Por esta razão, foi utilizado uma concentração de carbopol de 0,1% que apresenta uma tensão limite de escoamento em torno de 3 Pa, o que permitiu fazer testes com baixas pressões ( $\Delta P = 2,5 Psi$  aproximadamente).

A curva de escoamento foi obtida no reômetro rotacional AR-G2, da marca TA instruments, através do uso da geometria placas paralelas ranhurada (cross hatched) com 50mm de diâmetro. Essa geometria foi selecionada para minimizar os efeitos de deslizamento aparente, os quais comprometem a caracterização reológica (4).

Na Figura 3.11, pode-se observar que o Carbopol comporta-se como um fluido viscoplástico, visto que a viscosidade  $\eta$  (curva azul) diminui com a taxa de cisalhamento ( $\dot{\gamma}$ ), e a tensão de cisalhamento ( $\tau$ ) aumenta com o incremento

da mesma. Além disso, no início da curva vermelha que descreve a tensão de cisalhamento pode-se observar uma região horizontal, o que corresponde ao valor de  $\tau_0$  ou a tensão limite de escoamento.

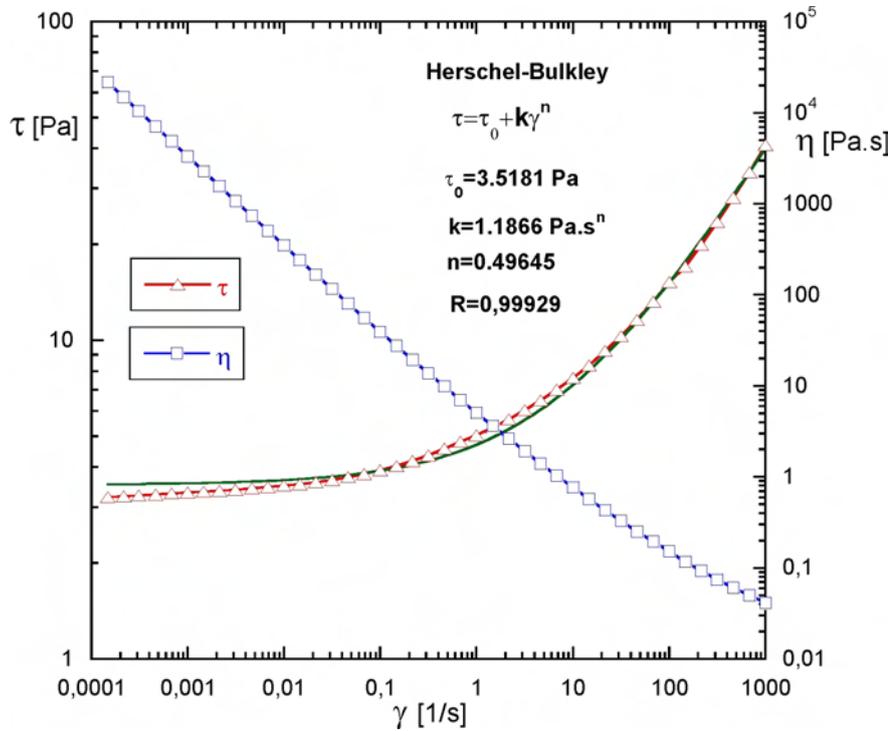


Figura 3.11: Curva de escoamento de Carboplo 0.1%

Por outro lado, a partir de aproximadamente 100 1/s de taxa de cisalhamento (*shear rate*) o fluido começa a mostrar o comportamento descrito pela função de viscosidade *power law* mencionada no capítulo 2.

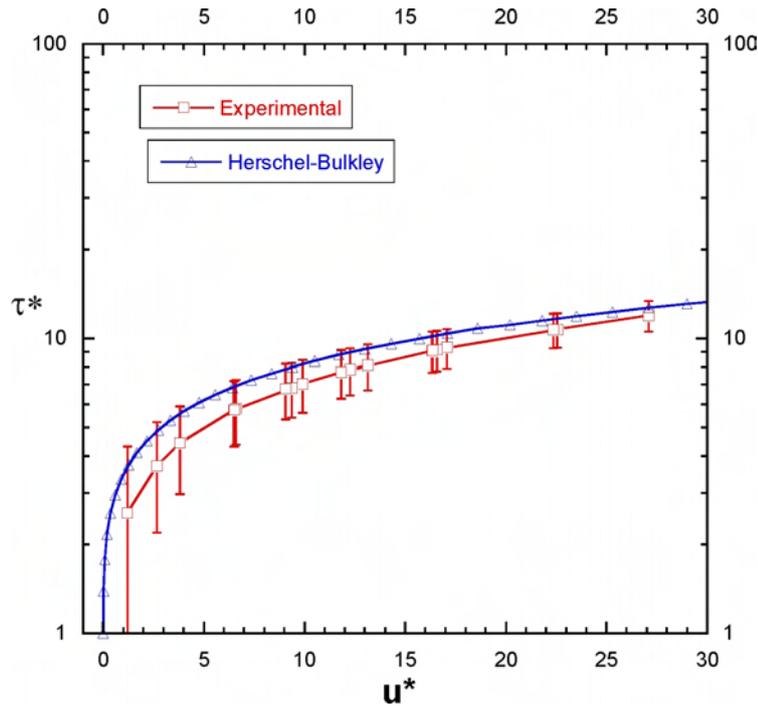
De igual forma, a Figura 3.11 mostra os parâmetros reológicos do Carbopol.

A seguir, foram feitos os testes experimentais seguindo o procedimento mencionado na seção 3.2. A equação de vazão do modelo Herschel-Bulkley (eq.2-22) foi empregada para obter a vazão teórica do escoamento.

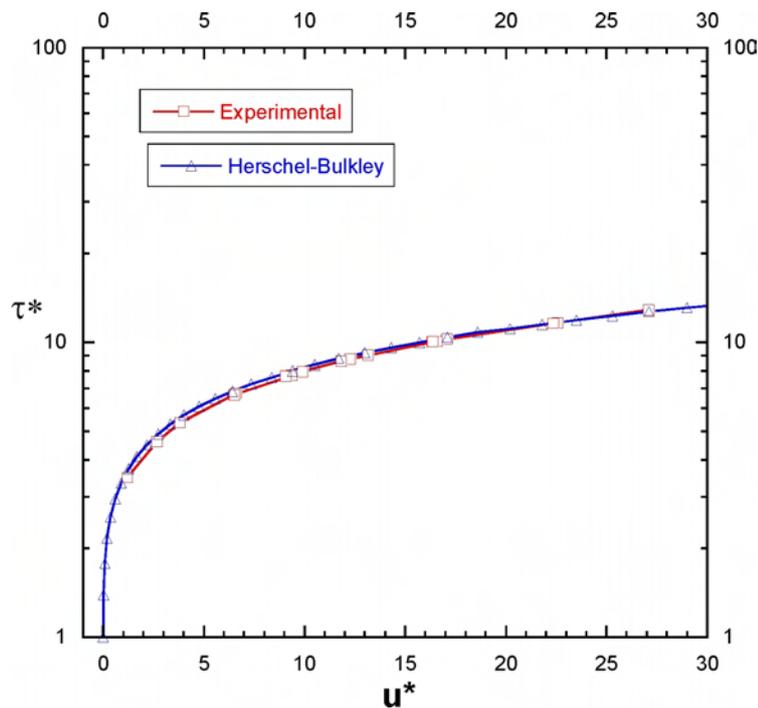
Na figura 3.12a são apresentados os resultados dos dados teóricos e experimentais. Na ordenada encontra-se a tensão adimensionalizada ( $\tau^*$ ) e a velocidade adimensional esta representada na abcissa do gráfico. Estes parâmetros foram adimensionalizados utilizando as equações 2-25, 2-37, 2-36 e 2-6.

A curva azul foi obtida, utilizando como dado de entrada o valor do  $n$  ou índice de comportamento do fluido, obtendo como resultado os valores de velocidade e tensão adimensionalizados teóricos.

A linha vertical descrita pelos resultados teóricos representa a condição de não escoamento do fluido. Esta condição se mantém até o ponto onde a



3.12(a): Comparação dos dados experimentais e teóricos como as incertezas geradas



3.12(b): Comparação dados experimentais e teóricos com ajuste

Figura 3.12: Validação com Carbopol 0,1%.

velocidade adimensional ( $u^*$ ) aumentar, o que evidencia o início do escoamento do fluido.

Na Figura 3.12a pode-se observar que os resultados experimentais seguem a mesma tendência que os dados teóricos. Além disso, a figura 3.12a mostra

a incerteza dos dados experimentais e como estes encontram-se dentro da incerteza gerada pela flutuação na leitura de queda de pressão.

Na figura 3.12b pode-se observar o ajuste dos dados experimentais. O ajuste realizado consiste na adição de 1psi na leitura de pressão, já que, 1 psi é o valor máximo de variação da leitura de queda de pressão do transdutor. O análise da incerteza pode-se observar detalhadamente no anexo D. Este análise mostra como a incerteza na medição de pressão de 1psi no transdutor de pressão, gera uma incerteza final de  $\pm 1,74\%$  apresentada na fig.3.12a.

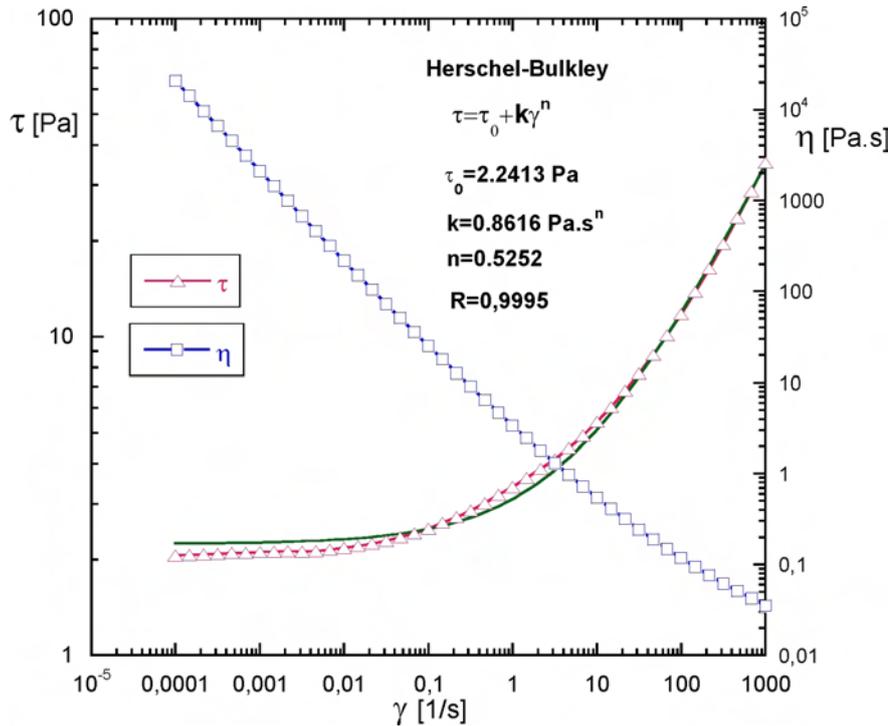
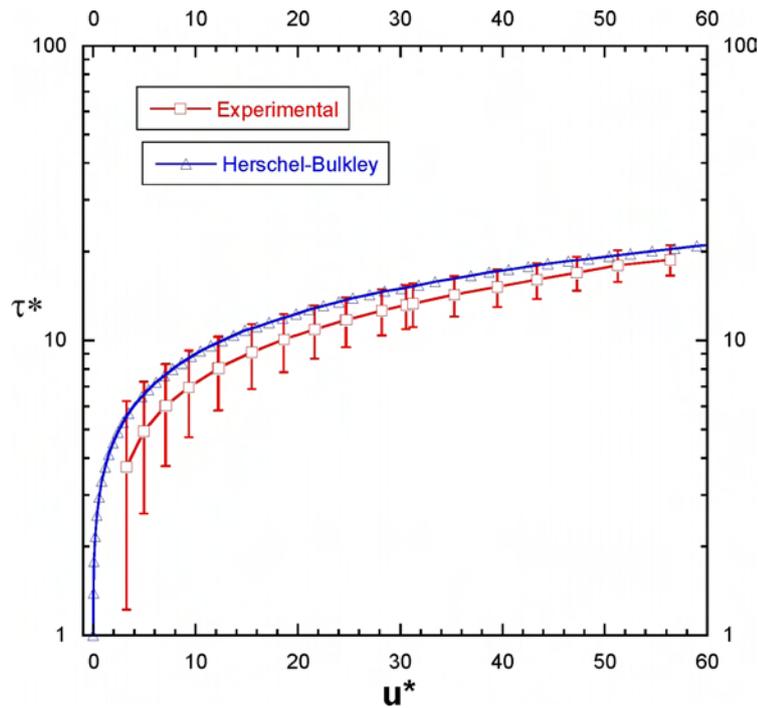


Figura 3.13: Curva de escoamento de Carboplo 0.1% amostra 2

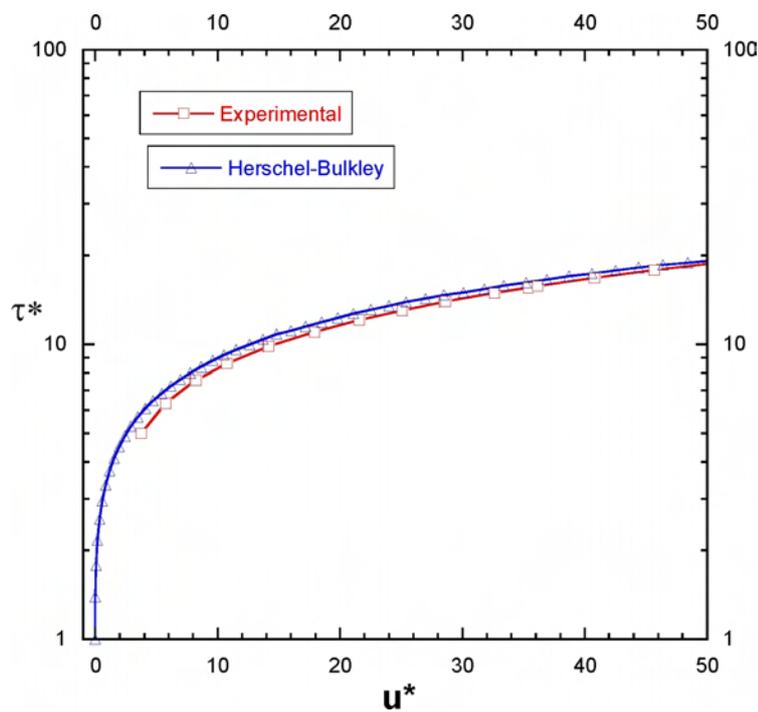
Foi feita outra série de testes com o objetivo de comprovar o comportamento das curvas experimental e teórica. A figura 3.13, mostra a curva de escoamento da segunda amostra de Carbopol 0,1% utilizado, além dos parâmetros reológicos calculados.

Os resultados da comparação feita com o segunda série de testes pode-se observar na fig.3.14a, mostrando de igual forma do que os testes anteriores, a semelhança na tendência dos dados experimentais e teóricos, além que a incerteza gerada pelos dados experimentais contém os dados teóricos.

A figura 3.14b contém os resultados das curvas logo do ajuste nos dados experimentais com a incerteza na leitura de pressão realizado na série anterior, confirmando assim, novamente, que a incerteza na bancada ocasiona a diferença entre as curvas. Assim, pode-se concluir que a bancada não



3.14(a): Comparação dos dados experimentais e teóricos como as incertezas geradas



3.14(b): Comparação dados experimentais e teóricos com ajuste

Figura 3.14: Validação com Carbopol 0,1% amostra 2.

apresenta efeitos de deslizamento na parede do tubo. O análise de incertezas é apresentado no anexo D.

### 3.3

### Testes finais

Os testes finais foram realizados com Carbopol sendo deslocado por óleo. Sendo assim, o fluido viscoplástico deslocado pelo fluido newtoniano.

O procedimento para realizar os testes de deslocamento foi:

- Fechar todas as válvulas.
- Abrir a válvula CV1-CV2-Carbopol, G2, G5, G8.
- Abrir G1 e logo após G6.
- Deslocar Carbopol até preencher tudo o circuito.
- Fechar a válvula G5, CV1-CV2-Carbopol, G6, G8.
- Abrir G4, G9 e G7.
- Tirar ao descarte o Carbopol do trajeto CV2 até D2.
- Fechar G6, G7, G9 e G4,
- Abrir a válvula G5, CV1-CV2- óleo, G6.
- Deslocar óleo até G8. Logo fechar G1.
- Ligar a placa eletrônica e labView.
- Ligar a Balança Digital.
- Fechar a G2 e abrir a G3, G10 e G4.
- Ligar a interface.
- Abrir a G1.
- Iniciar no Labview degrau com 0,15bar de pressão.
- Abrir A G8 até que a interface óleo-Carbopol fique dentro do tubo de resina.
- Parar o Labview degrau.
- Tarar a balança.
- Selecionar o tipo de teste no Labview.
- Preencher os parâmetros do teste no Labview.
- Iniciar a leitura do LabView.
- Parar a leitura do Labview.

A pressão para deslocar a interface desde a G8 até o tubo de resina é de 0,15Bar a fim de conservar a interfase dos fluidos. A interfase Labview, como já foi mencionado, tem 3 opções de testes, sendo o procedimento anterior válido para todos.

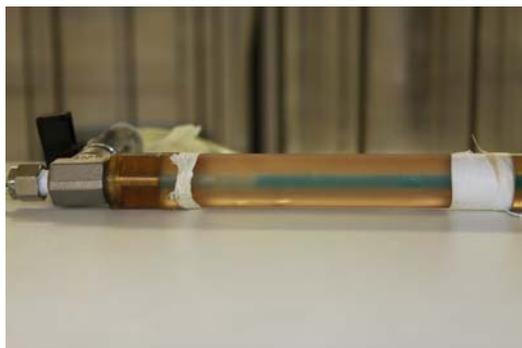


Figura 3.15: Visualização interfase Carbopol-óleo no tubo de resina

Devido ao fato da dificuldade apresentada para diferenciar os dois fluidos no tubo, o Carbopol foi pigmentado com corante azul marca Arcolor o que permitiu conhecer a localização da interfase como se pode observar na fig. 3.15. Além disso, a visualização ajuda para verificar se está ocorrendo a formação de finger.