

3 MÉTODOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo foi dividido em quatro partes. Inicialmente foi realizada a caracterização reológica dos fluidos de trabalho, em seguida foram medidos o ângulo de contato e a rugosidade das superfícies revestidas, posteriormente foram realizados os testes de escoamento entre placas paralelas e por último foram realizados os testes de medição da tensão de descolamento da parafina depositada nos diferentes revestimentos.

3.1 Reologia dos Fluidos

A caracterização reológica dos fluidos de trabalho foram efetuadas com o auxílio de um reômetro ARES.

Recebemos o óleo de Urucu (leve) e o óleo de Marlim (pesado) com o intuito de utilizá-los como fluidos de trabalho, pois havia a suspeita de que estes óleos apresentavam comportamento viscoplástico. Com o reômetro rotacional ARES efetuamos a caracterização reológica desses óleos, que apresentaram comportamento newtoniano à temperatura de 25° C, conforme ilustram as Figs. 3.1 e 3.2.

Utilizamos o método dos mínimos quadrados para a obtenção das propriedades reológicas a partir das curvas de escoamento. A partir da Fig. 3.1 obtivemos a viscosidade do óleo de Urucu, $\eta_0 = 0,0081$ Pa.s, e a partir da Fig. 3.2 obtivemos a viscosidade do óleo de Marlin, $\eta_0 = 0,427$ Pa.s.

Uma vez que ambos os óleos apresentaram comportamento newtoniano a 25° C (a temperatura dos testes do escoamento através das placas paralelas), buscamos outros materiais com comportamento viscoplástico nesta temperatura. Os materiais escolhidos foram uma suspensão base óleo e uma dispersão de Carbopol em água.

A caracterização reológica destes últimos materiais também foi efetuada com o reômetro ARES, e a curva de escoamento foi ajustada com o modelo SMD (9), dado a seguir:

$$\eta = \left(1 - \exp \left[-\frac{\eta_o \dot{\gamma}}{\tau_o} \right] \right) \left(\frac{\tau_o}{\dot{\gamma}} + K \dot{\gamma}^{n-1} \right) \quad (3-1)$$

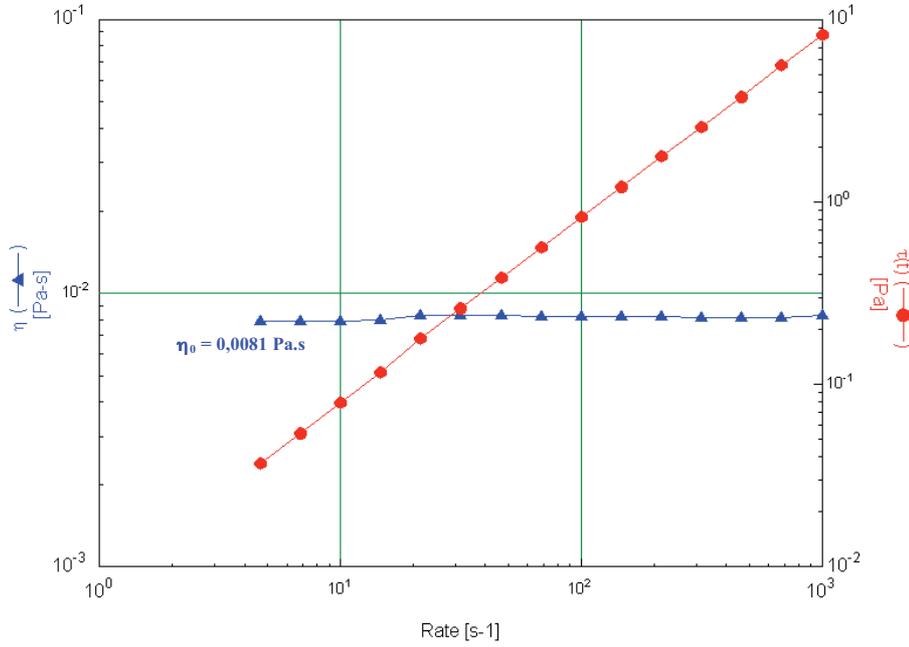


Figura 3.1: Curva de escoamento do óleo de Urucu.

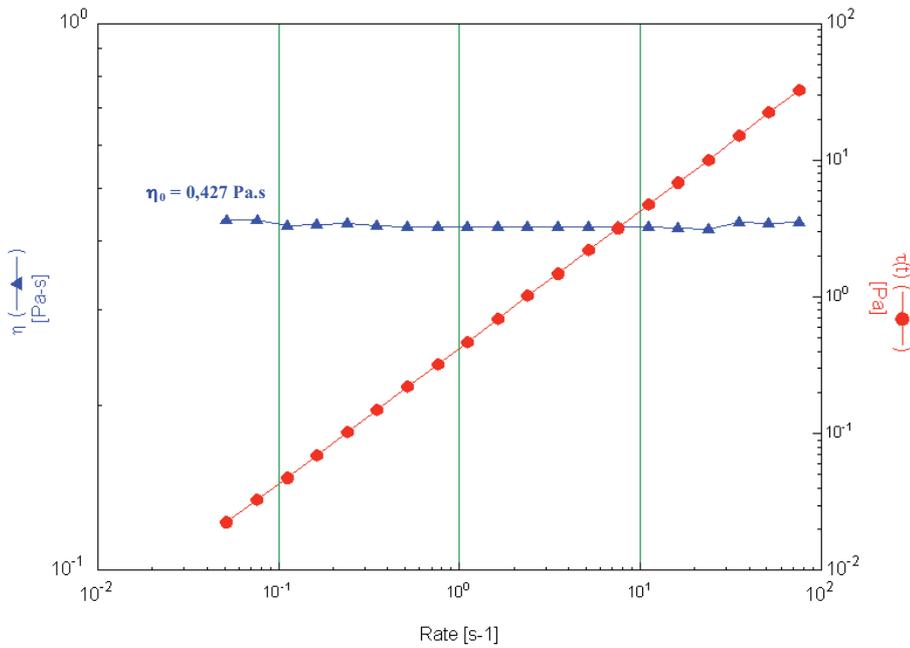


Figura 3.2: Curva de escoamento do óleo de Marlim.

Nesta equação, η_o é a viscosidade a baixíssimas taxas de cisalhamento, τ_o a tensão limite de escoamento, K o índice de consistência e n o índice de comportamento. Estas grandezas são obtidas a partir de um ajuste dos dados com o método dos mínimos quadrados. A curva de escoamento da dispersão de Carbopol 0,13% encontra-se na Fig. 3.3 e a da suspensão base óleo encontra-se na Fig. 3.4.

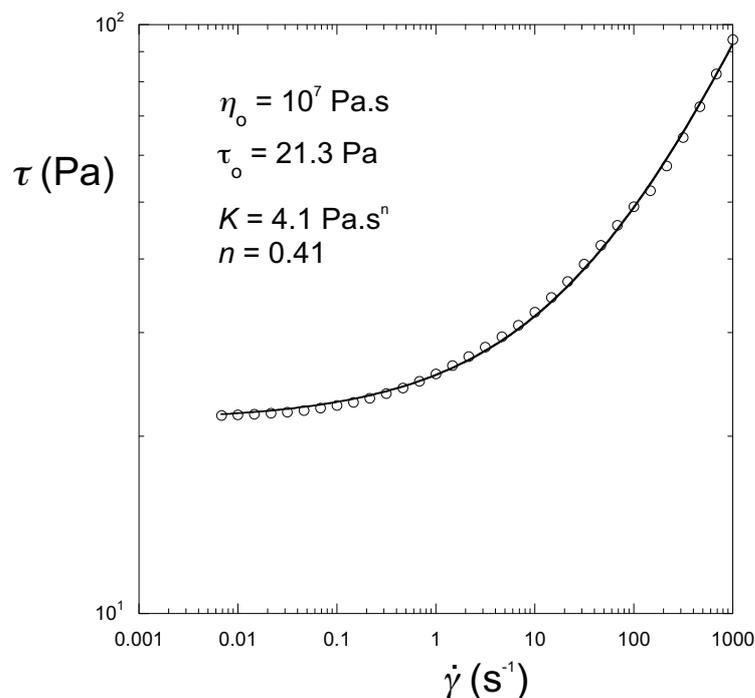


Figura 3.3: Curva de escoamento da dispersão de Carbopol 0,13%.

Observa-se nestas figuras que o comportamento destes dois fluidos é claramente viscoplástico, uma vez que, conforme a taxa de cisalhamento $\dot{\gamma}$ diminui, a tensão cisalhante τ tende a um valor constante, que é a tensão limite de escoamento τ_o . Observa-se também que o modelo SMD ajusta-se muito bem aos dados experimentais.

3.2

Avaliação do Ângulo de Contato e da Rugosidade

Para investigar a dependência com a molhabilidade e a rugosidade do deslizamento que ocorre nas paredes durante o escoamento entre placas paralelas, foram efetuadas medições de ângulo de contato e de rugosidade das superfícies revestidas.

O ângulo de contato entre água ou óleo e os diferentes revestimentos testados foi medido com a utilização de um goniômetro SEO. A rugosidade

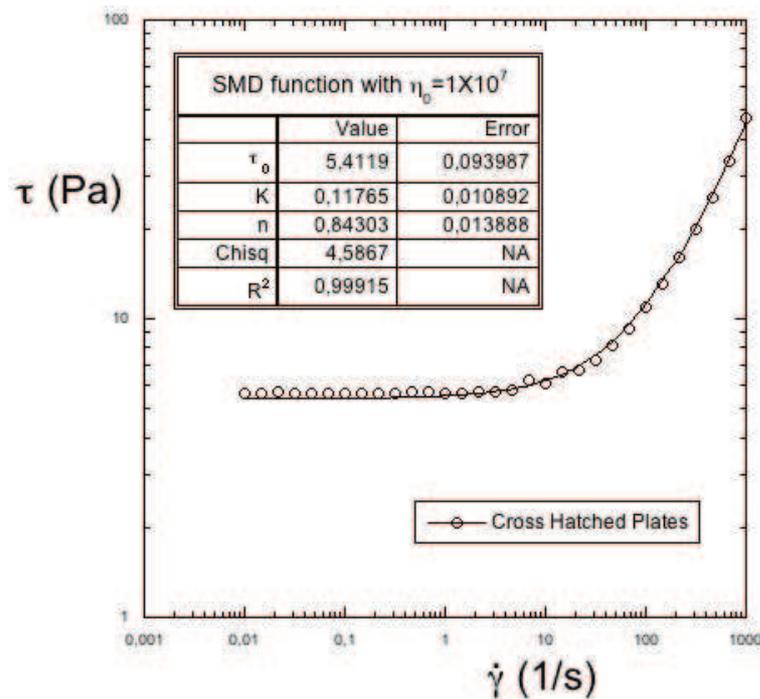


Figura 3.4: Curva de escoamento da suspensão base óleo.

das superfícies revestidas foi avaliada por medições realizadas com o auxílio de um rugosímetro. Algumas destas medições foram efetuadas na PUC-Rio, e outras na Universidade de São Paulo (USP).

A Fig. 3.5 ilustra o processo de determinação do ângulo de contato.

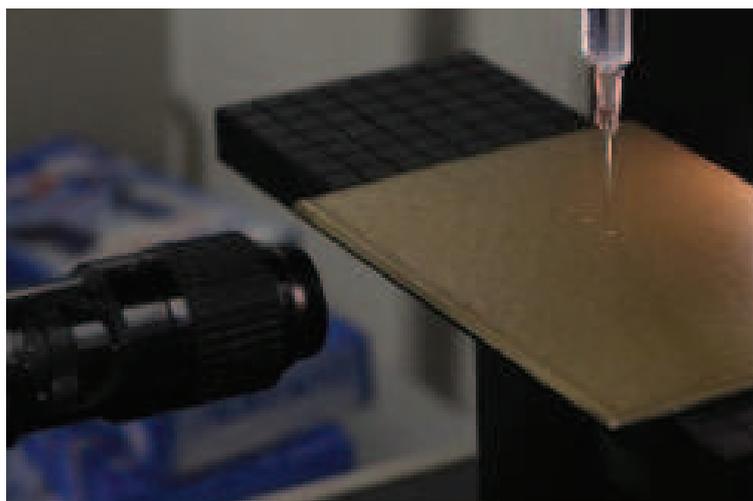


Figura 3.5: Medição do ângulo de contato com a utilização do goniômetro.

O goniômetro é ligado a um computador no qual utilizamos um software para captura das imagens da gota. O próprio programa realiza a medição do

ângulo de contato (ver Fig. 3.6). Para cada revestimento, realizamos entre 5 e 10 medições para cada placa, tanto para as gotas de água quanto para as gotas de óleo, obtendo um valor médio para o ângulo de contato.

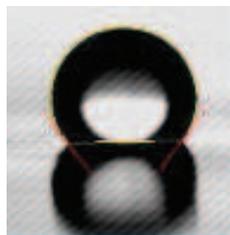


Figura 3.6: Imagem obtida pelo software utilizado para a medida do ângulo de contato.

A medição da rugosidade das placas revestidas foi efetuada no Laboratório de Metrologia Dimensional da PUC-Rio (LMD/ITUC/PUC-Rio). Essa medição foi realizada pelo método direto, em cinco posições diferentes igualmente espaçadas ao longo da superfície, utilizando-se o rugosímetro Taylor Hobson – Certificado de calibração no 0186/07 – LMD/ITUC/PUC-Rio.

3.2.1 Resultados

Foram enviadas pela USP duas remessas de placas revestidas. Os resultados das medidas relativas à primeira remessa de placas encontram-se sumarizados na Tabela 3.1. Nesta tabela a coluna designada “Descrição” refere-se à composição dos revestimentos aplicados nas placas pela USP.

Pela análise dos resultados da Tab. 3.1, podemos observar que o ângulo de contato depende tanto da composição do revestimento da placa quanto do fluido utilizado para efetuar a medida. Conforme era esperado, a placa de teflon possui um dos maiores ângulos para água por ser uma superfície hidrofóbica. Quanto mais hidrofílica a superfície mais a água consegue molhar esta superfície, sendo menor o ângulo de contato da água.

Na Tab. 3.2 encontram-se os resultados médios das medições efetuadas pela USP, relativas à segunda remessa de placas. Esta tabela fornece os ângulos de contato com água e com óleo, e a rugosidade média das superfícies. Podemos observar que a rugosidade é bem controlada através do lixamento, e que o tratamento com plasma não afeta a rugosidade. Também constatamos que a rugosidade é afetada diretamente pela lixa que foi utilizada e não pelo revestimento que recebe, visto que todas as placas que foram lixadas com a lixa 400 possuem a mesma rugosidade média independentemente do revestimento aplicado.

Tabela 3.1: Ângulo de contato e rugosidade – Primeira Remessa de Placas.

Placa n°	Descrição	Ângulo de contato médio da água	Ângulo de contato médio do óleo	Rugosidade média (μm)
1	60% CF_4 + 40% H_2 100 Mtorr / 2 min	82°	24°	0,086
2	60% CF_4 + 40% H_2 100 Mtorr / 5 min	82°	18°	0,110
3	Aço Inox	86°	24°	0,051
4	Sem Tratamento	86°	34°	0,075
5	Carbono	93°	12°	0,239
6	80% CF_4 + 20% H_2 500 Mtorr / 2 min	106°	46°	0,063
7	80% CF_4 + 20% H_2 500 Mtorr / 5 min	112°	45°	0,070
8	Teflon	115°	38°	0,473
9	Sulfonadas e Fluoradas	129°	34°	0,107

Tabela 3.2: Ângulo de contato e rugosidade – Segunda Remessa de Placas.

Placas n°	Descrição	Ângulo de contato médio da água	Ângulo de contato médio do óleo	Rugosidade média (μm)
1–4	Interzone 954, lixa 400	80°	24°	0,30
5–8	Interzone 954, lixa 1200	80°	24°	0,17
9–12	Interzone 954, lixa 2000	80°	24°	0,17
13–16	Interzone 954, lixa 2500	80°	24°	0,16
17–20	$\text{CF}_4 + \text{H}_2$, lixa 400	111°	32°	0,30
21–24	O_2 , lixa 400	31°	24°	0,30
25–28	Ar, lixa 400	62°	23°	0,30
29–32	SF_6 , lixa 400	114°	48°	0,30
33–36	CF_4 , lixa 400	110°	36°	0,30
37–40	$\text{SF}_6 + \text{CH}_4$, lixa 400	116°	36°	0,30

3.3

Escoamento entre Placas Paralelas

Nesta seção descrevemos os experimentos do escoamento dos materiais viscoplásticos através de um canal formado por duas placas paralelas afastadas por uma distância h . O objetivo era obter as curvas de vazão (ou velocidade média) x pressão para diferentes tipos de revestimentos das superfícies das placas em contato com o fluido. Estes resultados experimentais, ao serem

comparados com os resultados teóricos (sem deslizamento) correspondentes, forneceram uma quantificação do deslizamento ocorrido.

3.3.1 Montagem Experimental

A planta experimental consiste de uma bomba de deslocamento positivo, uma seção de testes, um reservatório, um manômetro digital (sensor de pressão) e uma balança.

A Figura 3.7 mostra o desenho esquemático da planta experimental e a Fig 3.8 mostra uma foto da bancada experimental.

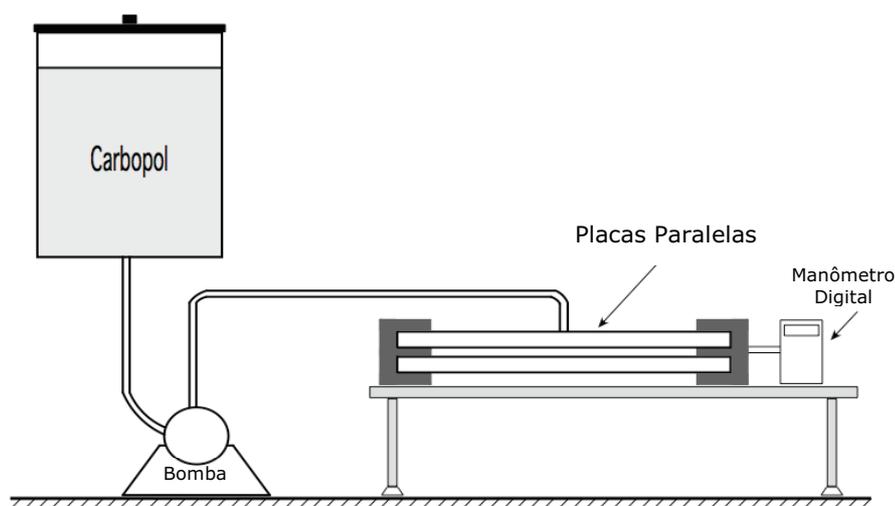


Figura 3.7: Desenho esquemático da planta experimental.

A seção de testes consiste de duas placas paralelas de dimensões 100 mm de largura, 150 mm de comprimento e espessura não inferior a 5 mm, conforme apresentado na Fig. 3.9. As placas, que constituem as paredes internas da passagem através da qual os fluidos escoam (Fig. 3.10), podem ser substituídas para permitir a investigação de diferentes tipos de revestimento. Na seção de testes, as placas são montadas de forma que a distância entre elas é sempre $h = 1$ mm.

3.3.2 Procedimento Experimental

Realizamos os testes de escoamento, bombeando os fluidos através da seção de testes e medindo a pressão na entrada das placas com um manômetro digital (Fig. 3.11). Dessa maneira, medimos a perda de carga durante o

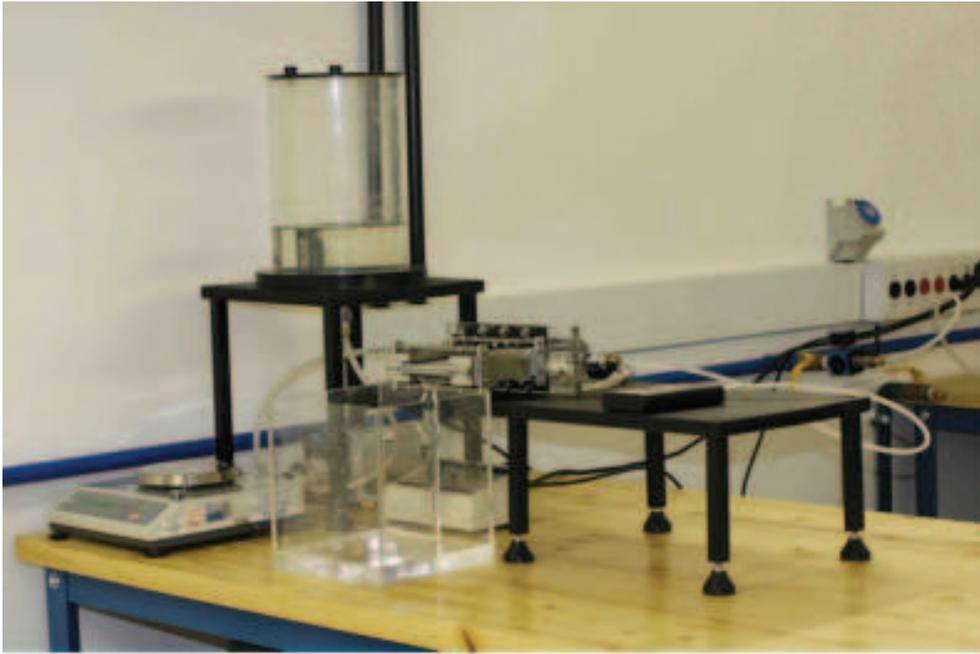


Figura 3.8: Planta experimental.



Figura 3.9: Seção de testes com placas inox sem revestimento.

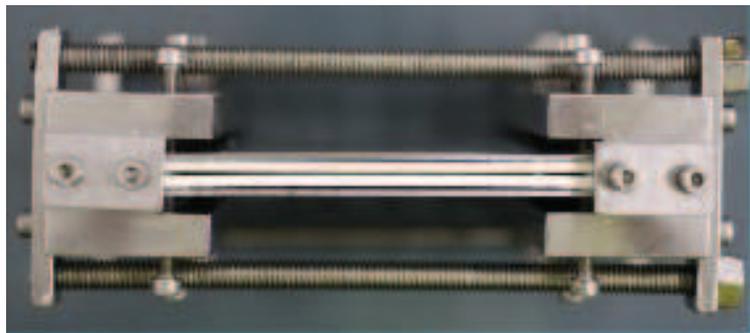


Figura 3.10: Seção de testes com as placas revestidas.

escoamento laminar entre as placas revestidas, de forma a poder avaliar o nível de deslizamento ocorrido.

Pela extremidade frontal da placa, coletamos o fluido que é forçado a passar pelas placas em um dado intervalo de tempo. Utilizamos um cronômetro

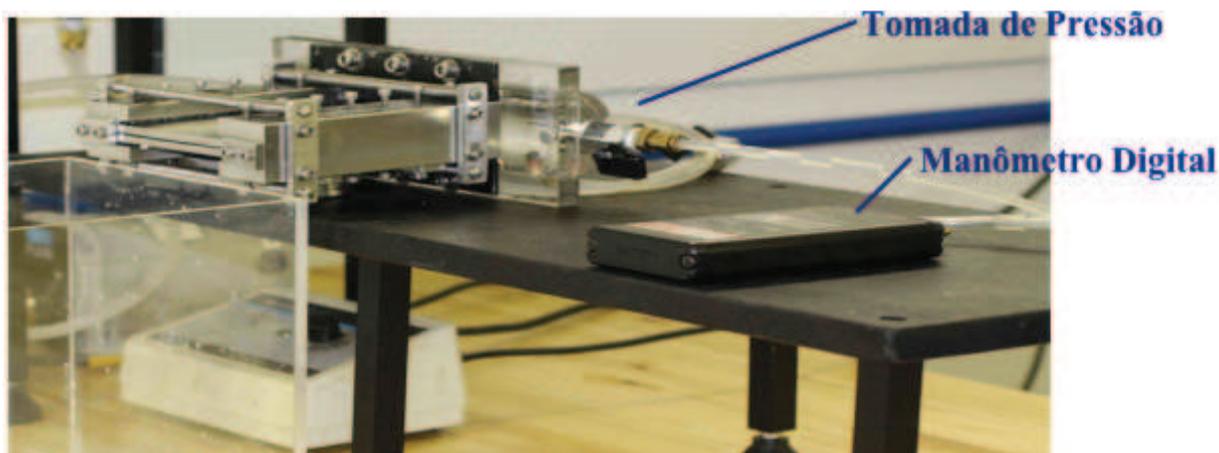


Figura 3.11: Tomada de pressão na entrada na placa.

para marcar este tempo. A massa deste fluido que foi recolhido é então medida, utilizando-se a balança que se encontra na bancada experimental. Dessa forma, dispondo do intervalo de tempo e da massa, determinamos a vazão do escoamento.

Para cada par de placas variamos a rotação da bomba de forma a se obter diferentes vazões de escoamento, para determinar a curva do escoamento para cada par fluido-sólido.

3.4 Medição da Aderência da Parafina

A última atividade deste trabalho consistiu na medição da tensão de descolamento de parafina depositada nos diferentes revestimentos. Para isso, um novo acessório foi projetado para o reômetro rotacional ARES a fim de obter a tensão cisalhante que causa o descolamento da parafina, e de medir a aderência da parafina em diversos revestimentos.

3.4.1 Metodologia

O acessório fabricado encontra-se apresentado na Fig. 3.12.

O acessório foi projetado seguindo uma metodologia desenvolvida em nosso laboratório no âmbito de uma cooperação anterior entre o Grupo de Reologia da PUC-Rio e o CENPES. Na Fig. 3.13 podemos observar o acessório montado no reômetro ARES, com uma das placas fornecida pela USP.

No copo do reômetro (Fig. 3.13) encaixamos as placas com revestimento, e sobre ela depositamos um pequeno anel de aço inox (diâmetro interno 4mm, altura 3mm e espessura da parede 1,05mm) dentro do qual vertemos parafina pura (parafina purificada 54°-56°C Vetec - Cód.1227) fundida a 60°C. Após



Figura 3.12: Equipamento para medir a aderência da parafina – Copo e Bob.

a solidificação e o resfriamento da parafina, encostamos o braço de alavanca (Fig. 3.13, o anel com parafina não aparece pois está sobre a placa atrás do braço de alavanca) e acionamos o motor do reômetro para impor uma pequena taxa de deformação constante, e observamos a evolução da tensão cisalhante ao longo do tempo. Após atingir um valor de pico, a tensão cai, e dessa forma sabemos que a parafina descolou.



Figura 3.13: Equipamento para medir a aderência da parafina montado no reômetro.