

4

Métodos Experimentais

Neste capítulo são descritos o projeto de construção da planta experimental, o sistema de visualização, o desenvolvimento dos fluidos a serem utilizados nos testes e seu comportamento reológico, e o procedimento de execução dos testes.

4.1

Projeto da Planta Experimental

Uma planta experimental foi construída para a visualização da interface entre os fluidos, possibilitando a validação dos resultados numéricos, a partir da comparação com os testes experimentais.

Intuitivamente, espera-se que interfaces com formato plano desempenhem melhor o trabalho de substituir um fluido que se encontrava no interior da geometria no instante inicial. Adicionalmente, interfaces acentuadas e pontiagudas sugerem um mau deslocamento, uma vez que uma grande quantidade de massa do fluido deslocado permanece no interior da geometria.

A fim de observar justamente a forma da interface entre dois fluidos num processo de deslocamento (substituição), uma planta experimental, que reproduz o processo, foi projetada e construída, e tem como estrutura básica o dispositivo construído por Tehrani (1992), mostrada, anteriormente, na figura 1.4.

Um desenho esquemático da planta desenvolvida para esse trabalho pode ser observado na figura 4.1. Nessa figura vemos a tubulação de entrada (1) do fluido deslocador que vem da bomba, conectada à câmara plena (3) que tem a função de uniformizar o escoamento que se direcionará para a seção vertical. Uma válvula de dreno (2) foi posicionada na câmara plena para eventuais operações de limpeza ou retirada de fluido do interior da planta experimental. Uma válvula de esfera (4) separa o fluido que está na câmara plena do fluido que está na região vertical anular. O tubo de acrílico

transparente (5) e o tubo de inox (6) formam a região anular vertical. Para promover a variação de excentricidade foram acopladas duas barras deslizantes (7), na extremidade inferior e superior do tubo de inox. A região de visualização está a 1,6 m do início do tubo de inox. Para melhores imagens uma câmara de visualização (8). Uma luminária (10), na direção oposta da câmara CCD (11) iluminava a região de visualização, no entanto uma folha de papel branco (9) diminuía a intensidade de luminosidade, a fim de dar o brilho adequado. A saída dos fluidos acontece na extremidade superior do tubo de inox. Nesse lugar se encontra um dispositivo de alumínio (12) dotado de quatro conectores para mangueira, por onde os fluidos se dirigem para o reservatório de descarte.

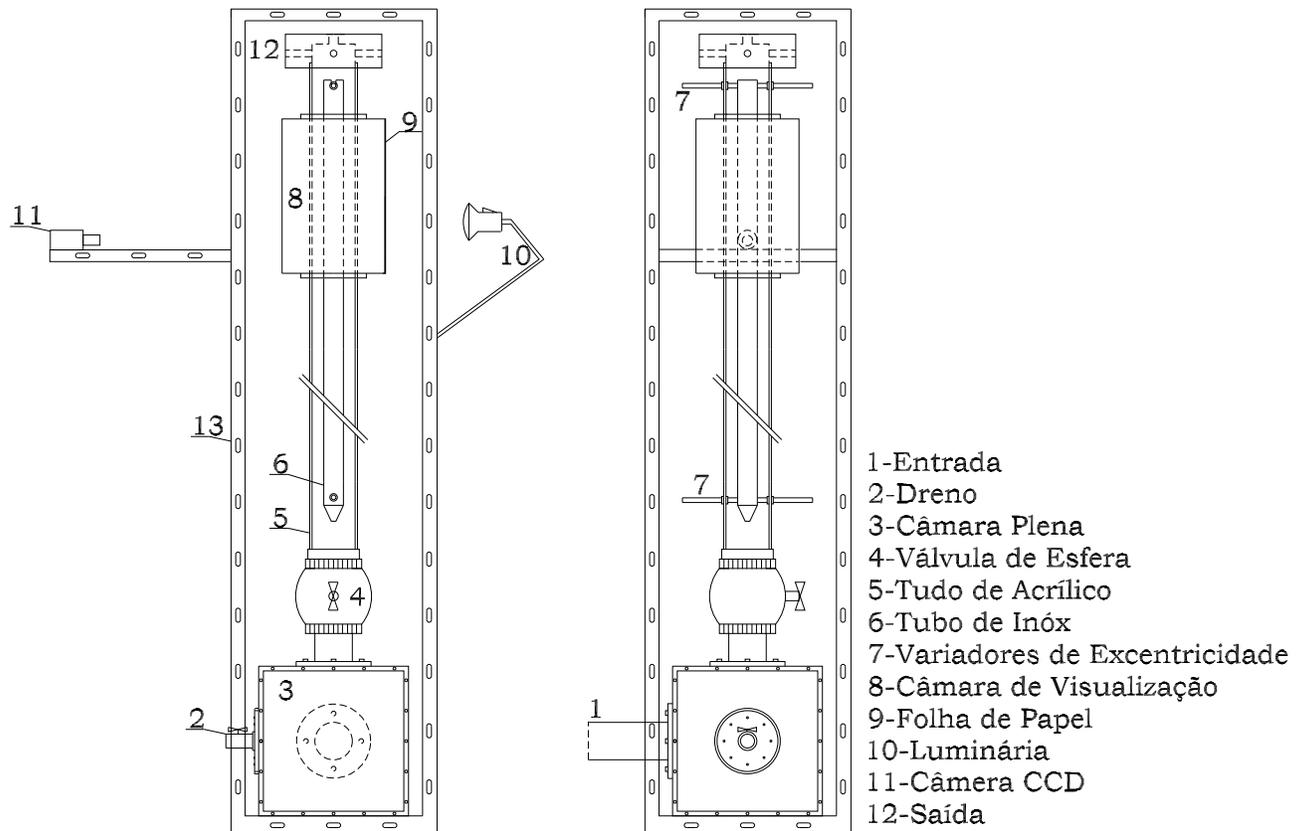


Figura 4.1: Diagrama Esquemático da Planta Experimental - Vista Lateral e Frontal

Para definir as dimensões dos diâmetros e das vazões foi utilizado o adimensional número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{\rho \bar{v} Dh}{\eta_c} \quad (4-1)$$

onde ρ é a densidade do fluido; \bar{v} é a velocidade média do escoamento; Dh é o Diâmetro hidráulico para espaços anulares = $D_o - D_i$ = diâmetro interno

do cilindro externo - diâmetro externo do cilindro interno e η_c é a viscosidade característica do fluido não newtoniano.

A viscosidade característica é definida como aquela avaliada numa taxa de cisalhamento também característica, dada pela expressão:

$$\dot{\gamma}_c = \frac{2\bar{v}}{Dh} \quad (4-2)$$

Por hipótese, define-se que o Re da planta experimental é igual ao do poço de petróleo:

$$Re_{poco} = Re_{planta} \quad (4-3)$$

$$\left\langle \frac{\rho\bar{v}Dh}{\eta_c} \right\rangle_{poco} = \left\langle \frac{\rho\bar{v}Dh}{\eta_c} \right\rangle_{planta} \quad (4-4)$$

A outra hipótese será que a densidade e a viscosidade dos fluidos na planta e no poço serão as mesmas. A velocidade média do escoamento é dada por $\bar{v} = Q/A$, onde Q é a vazão volumétrica e A é a área de seção reta transversal do anular. Com isso a equação 4-4 se torna:

$$\left\langle \frac{QDh}{A} \right\rangle_{poco} = \left\langle \frac{QDh}{A} \right\rangle_{planta} \quad (4-5)$$

De acordo com dados de campo, uma razão de diâmetro usual numa operação de tamponamento é de

$$RD = \frac{D_{o_{poco}}}{D_{i_{poco}}} = \frac{12,25}{5} = 2,45 \quad (4-6)$$

Então calculamos a área do anular (A) e o Diâmetro Hidráulico (Dh) em função unicamente do diâmetro do tubo externo, transparente, da planta:

$$A_{planta} = \frac{\pi}{4}(D_{o_{planta}}^2 - D_{i_{planta}}^2) = 0,6546D_{o_{planta}}^2 \quad (4-7)$$

$$Dh_{planta} = D_{o_{planta}} - D_{i_{planta}} = 0,5918D_{o_{planta}} \quad (4-8)$$

Após fazer as substituições necessárias temos:

$$Q_{planta} = 1,106D_{o_{planta}} \frac{Q_{poco}Dh_{poco}}{A_{poco}} \quad (4-9)$$

Como a área do anular e o diâmetro hidráulico do poço são conhecidos,

$A_{poco} = 0,0634 \text{ m}^2$ e $Dh_{poco} = 0,1842 \text{ m}$, temos que:

$$Q_{planta} = Q_{planta}(Q_{poco}, D_{o_{planta}}) = 3,213 D_{o_{planta}} Q_{poco} \quad (4-10)$$

Definindo o diâmetro interno do tubo externo da planta em $D_{o_{planta}} = 92 \text{ mm}$, podemos montar uma tabela 4.1 com a faixa de vazões praticada no poço e as vazões e velocidades correspondentes na planta:

Vazão Poço (bbl/min)	Vazão Poço (m^3/s)	Vazão Planta (m^3/s)	Velocidade Planta (m/s)
1	0,0027125	0,00080	0,1524
2	0,0054250	0,00160	0,3048
3	0,0081375	0,00241	0,4572
4	0,0108500	0,00321	0,6096

Tabela 4.1: Tabela de Velocidades

Obs: A unidade de vazão comumente utilizada na indústria de petróleo é bbl/min. $1 \text{ bbl/min} = 0,0027125 \text{ m}^3/\text{s}$.

A tabela 4.1 torna-se importante para uma boa estimativa da velocidade a ser praticada no experimento, uma vez que a visualização da interface entre os fluidos é a principal dificuldade para a definição da câmera digital. A velocidade máxima utilizada nesse trabalho ($v = 0,6096 \text{ m/s}$) está abaixo da velocidade máxima de aquisição de imagens pela câmera, o que garante uma boa qualidade das imagens a serem coletadas.

Uma vez definido o diâmetro do tubo transparente externo, de acrílico, e obedecendo a equação 4-6, o tubo interno, de aço inox polido, deve ser automaticamente $D_{i_{planta}} = 42 \text{ mm}$, ambos com um comprimento de aproximadamente 2,5 m.

Uma imagem geral da planta experimental construída pode ser vista na figura 4.2.

Tendo como principal influência a planta experimental construída por Tehrani (1992)[30], a variação da excentricidade foi possível a partir de uma barra posicionada nos dois extremos da seção de teste. Essa barra é intrusiva no escoamento. No entanto, a primeira barra está a montante do escoamento, longe da câmara de visualização, dando tempo para possíveis correções no escoamento. A segunda barra, a jusante, não interfere na visualização. O ajuste da excentricidade era cuidadosamente feito com o auxílio de um paquímetro.

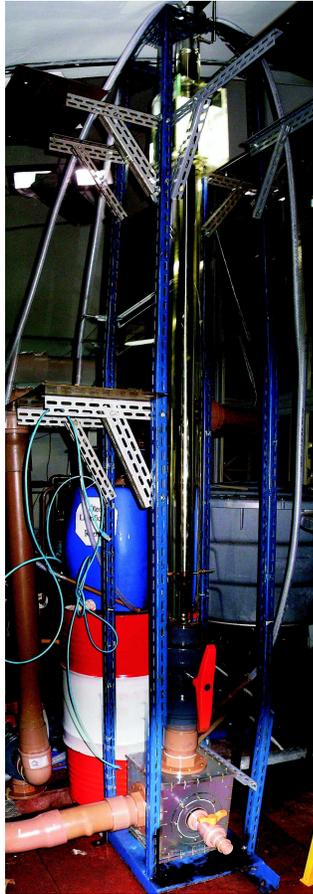


Figura 4.2: Planta Experimental - Visão Geral

4.2 Sistema de Visualização

A visualização foi feita com uma câmera CCD monocromática da marca PCO. Imaging modelo PixelFly. O sensor CCD é do tipo VGA (320 x 240). Na configuração usada, o tempo de exposição do sensor foi de 7 ms e o tempo de leitura 12,8 ms, totalizando para cada imagem, 19,8 ms, ou seja, aproximadamente 50 FPS (frames por segundo) As imagens são capturadas pela câmera e são transferidas, em 12 bit, em alta velocidade para uma placa de vídeo formato PCI conectada a placa mãe do computador. As imagens são armazenadas na memória RAM, já com 16 bit onde 4 bit são zero, do computador. Ainda na placa de memória RAM os 16 bit são convertidos para 8 bit (256 tons de cinza) e assim podem ser transmitidos para a placa de vídeo conectada ao monitor. Essa placa de vídeo estava configurada para 32 bit. Com um software do próprio fabricante da câmera e da placa de vídeo é possível dar comandos à câmera e visualizar as imagens obtidas. O pós-processamento pode ser feito criando-se um filme com todas as imagens

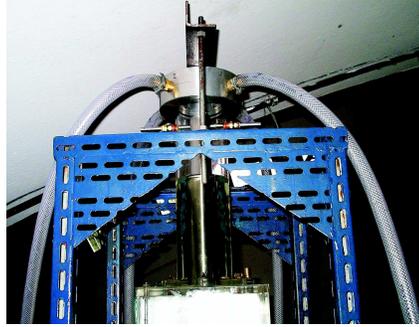


Figura 4.3: Região Jusante - Mangueiras de Saída e Variador de Excentricidade Superior

obtidas, ou então escolhem-se quadros separadamente. Acoplada à câmera, uma lente ajustava o foco e a luminosidade no seu sensor. Uma câmara de visualização retangular, de vidro, com 330 mm de altura, 220 mm de largura e profundidade, envolvendo o tubo de acrílico foi posicionada na seção de teste. Sua função é evitar efeitos de lente, uma vez que a luz sofre refração ao atravessar a parede do acrílico, alterando a imagem real. A câmara de visualização é preenchida com glicerina, que tem o índice de refração próximo ao do vidro. Logo, efeitos ópticos indesejáveis são minimizados. A câmara CCD está a uma distância de 900 mm da seção de teste. O campo de visualização é de 111 mm de largura, um pouco maior do que o diâmetro interno do tubo de acrílico e de 84 mm de altura. Uma lâmpada de luz fluorescente está montada atrás da seção de teste. Sua função é iluminar a câmara de visualização de forma indireta. Para isso foi colada uma folha de papel branco na superfície diretamente iluminada pela lâmpada. Esse arranjo foi aquele que proporcionou as melhores imagens. Testou-se inicialmente a formação de um plano vertical gerado por um laser. Esse plano seria a forma ideal de comparação entre a simulação experimental e numérica. No entanto, esse plano se mostrou ineficaz, dado que não iluminava de forma homogênea todo o espaço anular. Regiões próximas da parede do acrílico eram mais bem iluminadas do que regiões próximas do aço inoxidável.

4.3

Sistema de Bombeamento

Para o bombeamento do fluido deslocador foi usada uma bomba helicoidal de cavidade progressiva trifásica. Optou-se por esse tipo de dispositivo para que a degradação das estruturas das soluções poliméricas

sejam anuladas. Essa degradação pode ocorrer no contato do fluido com as unidades rotativas ao ser cisalhado. Toda a cavidade por onde escoo o fluido é de aço inoxidável, evitando, assim, oxidação do equipamento. A tubulação do reservatório para a bomba e da mesma até a seção de teste, foi feita de PVC (marrom), soldável, dado que este material não reage quimicamente com os fluidos testados. Variou-se a vazão com um inversor de frequência. A calibração do conjunto inversor-bomba foi realizada com uma célula de carga que media o peso de um volume de água bombeado durante um instante de tempo medido com um cronômetro. Como resultado da calibração da bomba temos o gráfico 4.4. A vazão máxima possível no equipamento era de 15000 l/h, e a pressão máxima na saída da bomba, 637,4 KPa (6,5 Kgf/cm²).

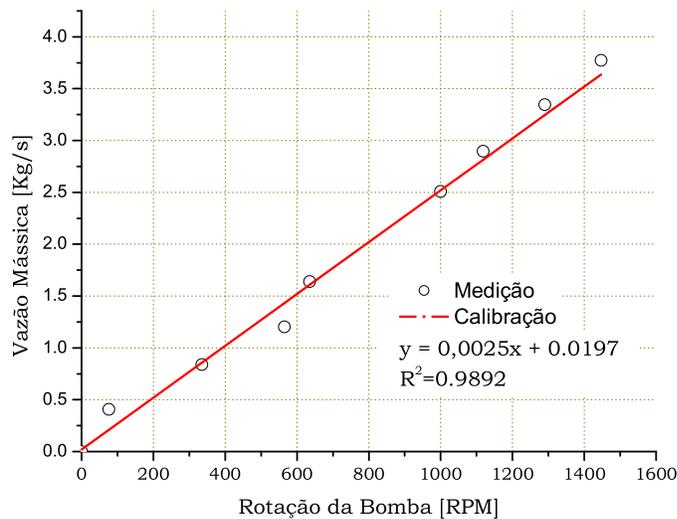


Figura 4.4: Calibração da Bomba

De acordo com a tabela 4.1, quatro vazões foram testadas.

4.4

Preparação dos Fluidos

Para representar os fluidos não newtonianos usados na indústria de petróleo - pasta de cimento e fluido de perfuração - foram desenvolvidas soluções aquosas com polímeros sintéticos - Carbopol 676 (BF Goodrich). O desenvolvimento do fluido requer alguns cuidados. Soluções aquosas (água deionizada) de Carbopol são ligeiramente ácidas e se tornam mais viscosas e estáveis quando neutralizadas. Maiores informações sobre carbopol podem

ser encontradas em [5]. A adição de hidróxido de sódio (NaOH) provê a neutralidade da solução final.

4.5

Caracterização Reológica

O reômetro rotacional **ARES-LS** (*TA Instruments*) foi usado para a caracterização reológica dos fluidos. A geometria adotada foi a de copo-couette com 34 e 32 mm de diâmetro, respectivamente, com uma altura de 33 mm. A geometria externa era responsável pela rotação. Todos os testes foram realizados à temperatura ambiente de 25 °C.

As densidades do óleo e do carbopol foram medidas no Laboratório de Caracterização de Fluidos da PUC-Rio com um picnômetro a uma temperatura de 25°C. Para o óleo, o valor obtido foi de 0,8497 g/ml com uma incerteza de 0,0003 g/ml. Para o carbopol o valor medido foi de 0,9934 g/ml com igual incerteza. Esse valor próximo da água já havia sido comentado na literatura [25], onde se recomenda que para soluções aquosas de polímeros, utilize-se todas as propriedades da água, com exceção da viscosidade.

Após as medições de densidade e tensão superficial, foi feita uma caracterização reológica dos fluidos reais (pasta de cimento e fluido de perfuração). Colchões lavadores, por serem mistura de água com detergente, foram considerados como fluidos newtonianos, com viscosidade 10 vezes maior que a água. Assim, estabelece-se que a viscosidade do colchão é $\mu_{colchao} = 10 \text{ cP} = 0,01 \text{ Pa.s}$. Na figura 4.5 vemos medidas experimentais da viscosidade em função da taxa de cisalhamento, dos fluidos utilizados em campo. Vemos um comportamento pseudoplástico para o cimento e o fluido de perfuração, sendo que este último atinge um patamar de viscosidade constante a altas taxas de deformação.

Na figura 4.6 vemos o nível de viscoplasticidade dos fluidos. Na pasta de cimento, vemos que diminuindo a tensão até aproximadamente 20 Pa temos um aumento abrupto da viscosidade, sendo que nesse teste não foi possível observar o patamar de alta viscosidade como visto na figura 2-34. O fluido de perfuração não apresentou tensão limite de escoamento tão nítida.

Para representar matematicamente os resultados experimentais, foram realizados ajustes de curva como os modelos de *Carreau* para o fluido de perfuração e de *Herschel-Bulkley (H-B)* para a pasta de cimento (figura 4.7). Esse ajuste foi feito como mencionado no apêndice 2. Apesar do teste de reologia do fluido de perfuração não apresentar uma tensão limite de escoamento, este material também teve seus dados ajustados pelo modelo

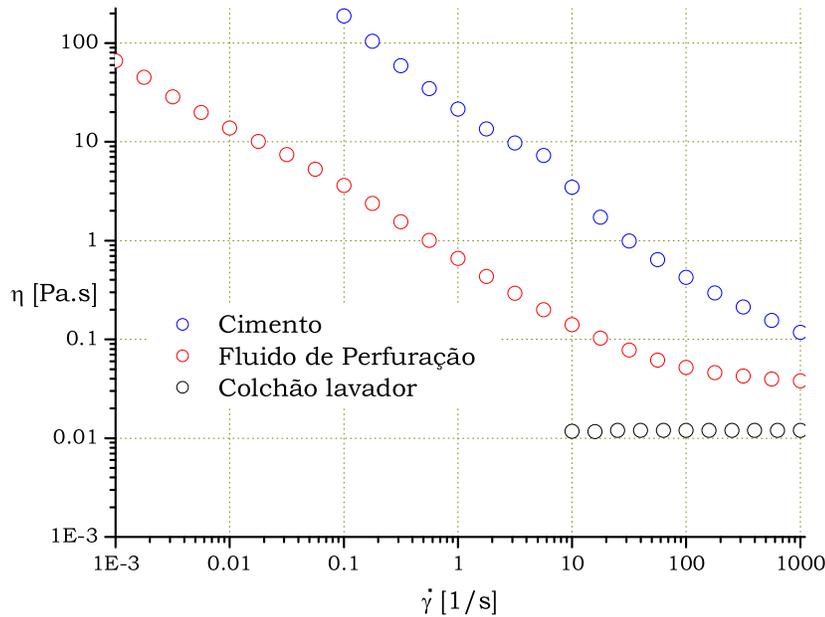


Figura 4.5: Função Viscosidade para Fluido de Perfuração, Cimento e Colchão, Medida Experimentalmente

de *Herschel-Bulkley*. Um dos objetivos das simulações numéricas é, inclusive, identificar qual modelo fornece os melhores resultados, tendo como referência sempre as imagens obtidas experimentalmente.

Vemos ainda na figura 4.7 que o ajuste para o fluido de perfuração com o modelo *Herschel-Bulkley* apresenta problemas a altas taxas, e não consegue prover a assintotização para um patamar de viscosidade constante. Por outro lado, o modelo de *Carreau* prevê esse patamar, o que permitiu um ajuste praticamente perfeito.

Os parâmetros do ajuste podem ser observados nas tabelas 4.2 e 4.3:

Modelo	η_0 (Pa.s)	η_∞ (Pa.s)	λ (s)	n	τ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)
<i>Carreau</i>	66,2	0,038	600	0,25	-	-
<i>Herschel-Bulkley</i>	-	-	-	0,4	0,03	0,8

Tabela 4.2: Parâmetros Reológicos do Fluido de Perfuração Ajustado com os Modelos *Herschel-Bulkley* e de *Carreau*.

Uma vez que é inviável a utilização de fluidos reais no experimento, por motivos de limpeza, preparo e até de deterioração da planta, soluções

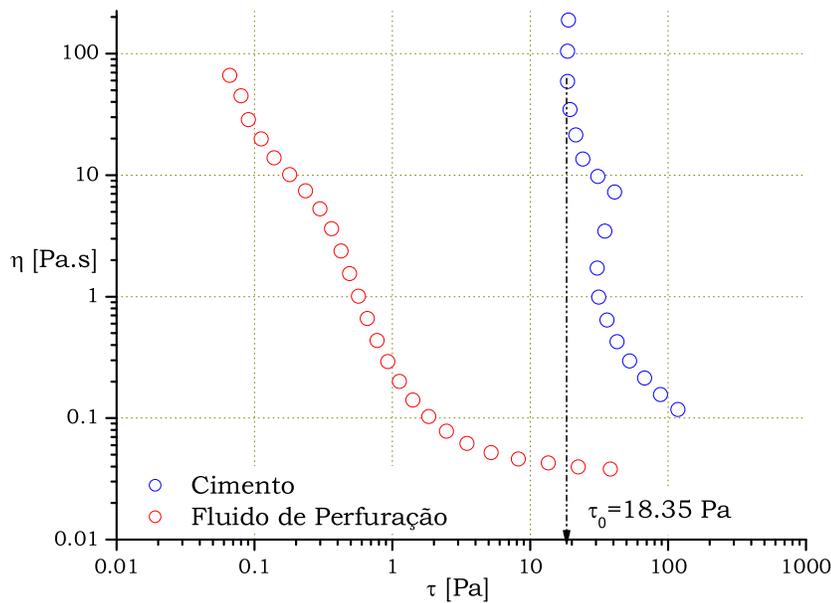


Figura 4.6: Viscosidade x Tensão Cisalhante - Avaliação da Tensão Limite de Escoamento

Modelo	n	τ_0 (Pa)	k (Pa.s ⁿ)
<i>Herschel-Bulkley</i>	0,6	18,5	1,52

Tabela 4.3: Parâmetros Reológicos da Pasta de Cimento Ajustado com os Modelos *Herschel-Bulkley*.

poliméricas que apresentem o mesmo comportamento reológico dos fluidos reais foram desenvolvidas. Entretanto, não foi possível obter o mesmo valor de densidade dos fluidos. Fluidos de perfuração e pasta de cimento, devido à adição de sais e partículas, têm a densidade maior que a água, e por consequência, maior que a das soluções poliméricas. Outro fator que proíbe a utilização dos fluidos reais é a sua não transparência. Para as visualizações é imprescindível que ao menos o fluido deslocador seja transparente. Caso o fluido deslocado seja opaco, um filme se formará na parede do tubo de acrílico, impossibilitando a observação da interface entre os fluidos. Como já fora mencionado antes, o polímero utilizado para prover as propriedades reológicas de interesse foi o carbopol 676. Diversas concentrações foram desenvolvidas, e aquela que melhor se ajustou com os dados de reologia do fluido de perfuração e da pasta de cimento foram respectivamente as soluções 0,09% e 0,15% wt. A comparação dos testes reológicos entre os fluidos pode ser observado na figura 4.8

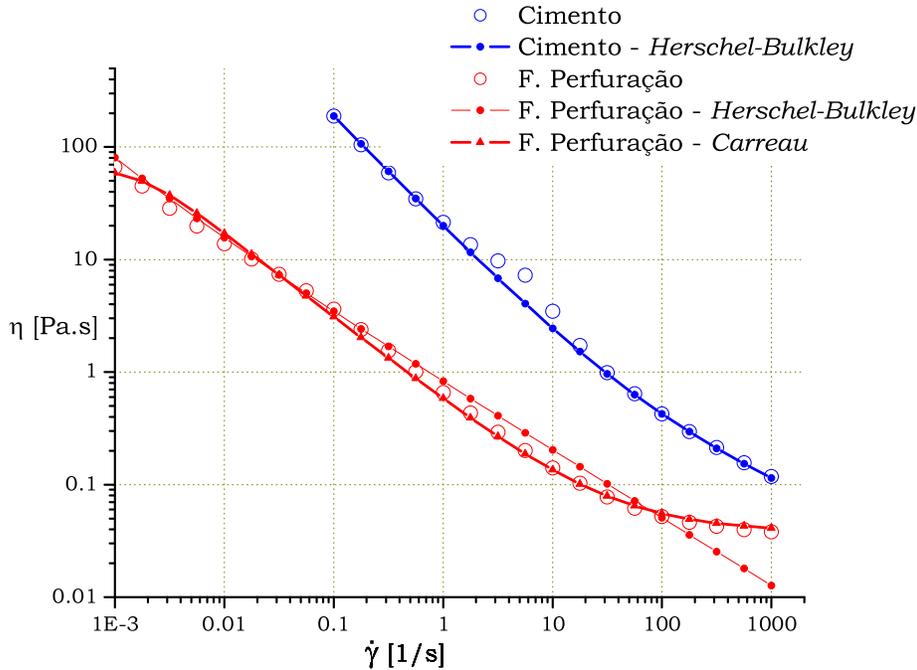


Figura 4.7: Ajuste de Curva - Teste de Reologia para cimento e fluido de perfuração x Modelos de *Herschel-Bulkley* e *Carreau*

4.6 Procedimento Experimental

4.6.1

Caso 1 - Fluido Newtoniano deslocando um não Newtoniano

Neste caso, o fluido deslocador é o não newtoniano (carbopol 0,15%), que está armazenado no reservatório conectado à bomba. O procedimento de inicialização do teste consiste em bombear o carbopol até uma posição acima da válvula, com o interior do anular ainda vazio. Por um orifício, que pode ser aberto ou fechado, por intermédio de um parafuso, enchemos o interior do tubo a uma altura de aproximadamente 100 mm de óleo, o que em volume corresponde a 665 ml. Esse pequeno trecho de óleo tem como função evitar que o restante de óleo, que será introduzido pela parte de cima, não modifique a forma plana da interface inicial carbopol-óleo, amortecendo a sua queda. Devido à diferença de densidades entre os fluidos, esta interface permanece em repouso até o teste iniciar. Ver figura 4.9.

Após preencher a região anular com o óleo, configura-se a velocidade de rotação da bomba no inversor de frequência, e a câmera CCD. Nesse momento o teste está pronto para começar. Um esquema passo-a-passo do procedimento experimental do caso 1 pode ser observado na figura 4.10.

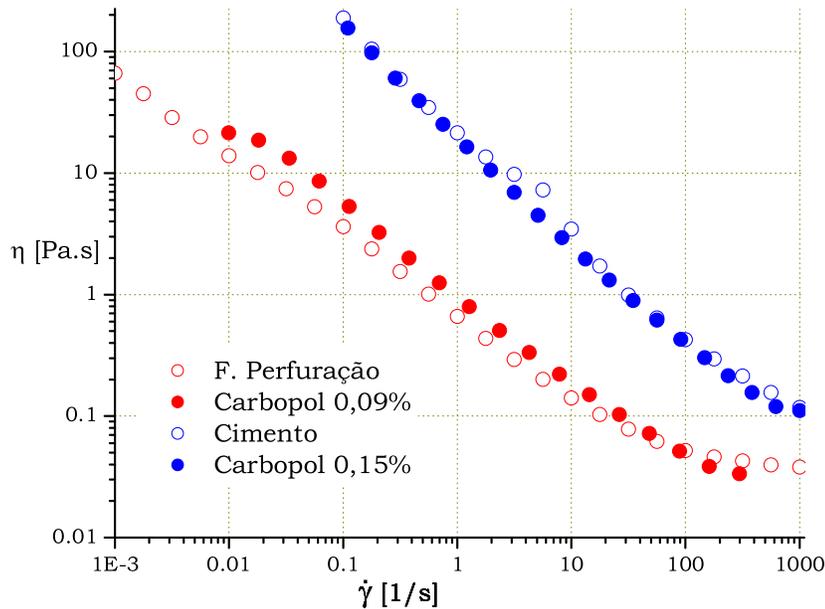


Figura 4.8: Função Viscosidade - Fluidos x Carbopol

Os testes duram entre 5 a 20 segundos, na maior e menor vazão respectivamente. Na saída do experimento, mangueiras estavam conectadas a um pequeno reservatório capaz de armazenar o produto da mistura do teste. Mais uma vez, por terem diferentes densidades, era fácil separar o óleo do carbopol. O óleo seria novamente reaproveitado para outros testes, já o carbopol era descartado.

Testes reológicos periódicos eram realizados, a fim de monitorar eventuais mudanças das propriedades, sobretudo a viscosidade. O carbopol apresenta boa estabilidade, não perdendo suas características com o tempo (e.g. 1 a 2 meses).

O processo de limpeza do experimento era longo e requeria no mínimo duas pessoas, porém necessário. A cada teste, o conjunto acrílico-inox era retirado, e limpadado com bastante água e detergente. Inicialmente, pensou-se em passar álcool no interior do anular, no entanto, sua superfície apresentou pequenas trincas, devido à ação química do líquido no material plástico. Portanto seu uso foi descartado.

Diversos testes foram realizados, obtendo-se boa repetibilidade das imagens obtidas da forma da interface entre os fluidos. Foram então coletadas 12 imagens - 4 vazões para 3 excentricidades - que por sua vez foram comparadas qualitativamente com aquelas obtidas na simulação numérica.

Na tabela abaixo 4.4 vemos um resumo das velocidades médias na en-

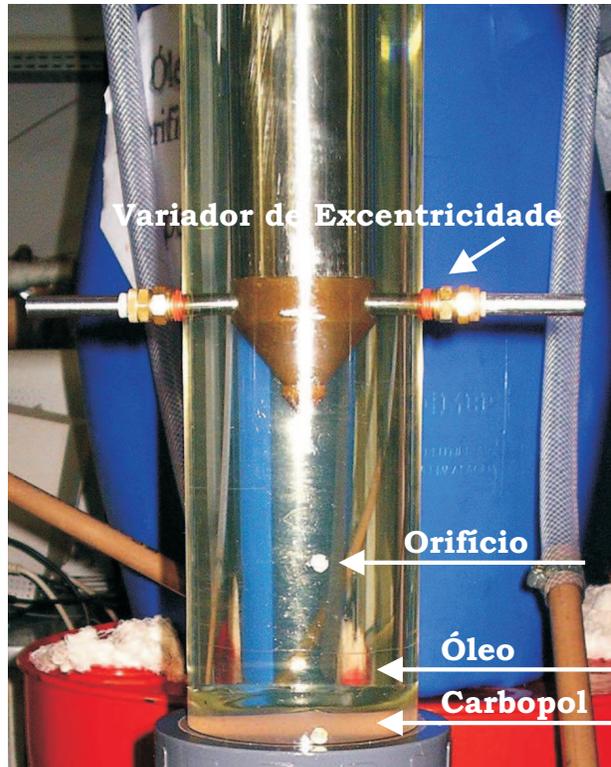


Figura 4.9: Condição Inicial do Caso 1

trada da planta praticada em cada teste, taxa de cisalhamento e viscosidade característica, o número de Reynolds e o número de Capilaridade.

Velocidade (m/s)	$\dot{\gamma}_c$ (1/s)	η_c (Pa.s)	<i>Re</i>	<i>Ca</i>
0,1524	6,096	19,23	0,396	146,5
0,3048	12,19	19,06	0,798	290,5
0,4572	18,29	18,98	1,202	433,9
0,6096	24,38	18,92	1,608	576,7

Tabela 4.4: Tabela de Número de Reynolds e Capilaridade - Caso 1

Uma vez que os números de Reynolds encontrados foram baixos, próximos da unidade, o parâmetro usado para avaliar efeitos de tensão superficial no experimento foi o número de Capilaridade equação 2-36. Como os valores obtidos para *Ca* são bem maiores do que a unidade é possível desprezar tais efeitos. Isso, inclusive, explica porque na simulação numérica o problema era insensível à variação do ângulo de contato entre os fluidos e a parede.

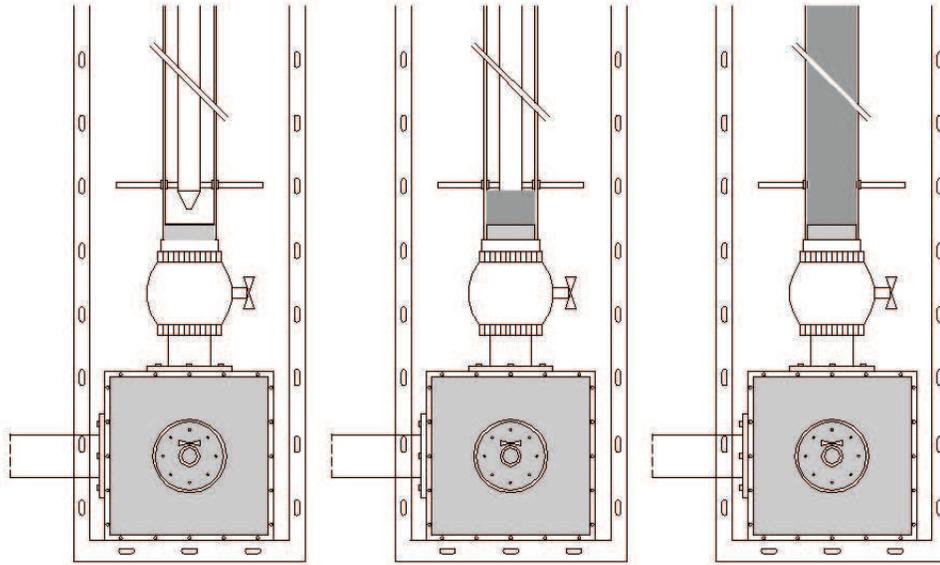


Figura 4.10: Procedimento experimental – Passo-a-passo – Caso 1

4.6.2

Caso 2 - Fluido não Newtoniano deslocando um Newtoniano

Neste caso, algumas mudanças foram realizadas com relação ao caso 1. Como o fluido que representa o colchão (óleo) seria o deslocador, não seria possível que este ficasse abaixo do carbopol 0,09% como no caso anterior, devido à força de empuxo. Para contornar esse problema, o óleo foi substituído por água deionizada, que possui a mesma densidade do carbopol ($998,2 \text{ Kg/m}^3$).

Por ser uma solução aquosa, era necessário saber se a miscibilidade entre o carbopol e a água teria alguma interferência no processo de deslocamento. Para investigar o nível de difusão carbopol 0,09% na água, foi adicionado corante preto na água. Essa adição, por ser em baixa quantidade não era capaz de alterar a densidade, tampouco a viscosidade da água. Num béquer cheio de carbopol foi inserida uma quantidade de água com corante. Foi possível observar que a interface dos fluidos permanecia nítida, ou seja, a difusão ocorria muito lentamente. O tempo do teste seria muito menor do que o tempo de difusão.

Partindo para o experimento, tentou-se praticar o teste de forma análoga ao caso 1: bombeando a água com corante até uma posição acima da válvula, em seguida inserindo o carbopol 0,09% pelo orifício mostrado na figura 4.9. Entretanto, não foi possível criar uma interface plana. O carbopol perfurava a água e não retornava a uma condição de equilíbrio ideal. Esse indesejável fenômeno ocorreu devido à tensão limite de escoamento do

carbopol.

A única forma possível de realizar o teste foi bombear a água até passar ligeiramente a esfera da válvula, que era então fechada. Retirava-se o excesso de água formado, e se instalava o anular vertical. Em seguida, a região anular era totalmente preenchida somente com carbopol. O teste iniciava com a abertura da válvula e a imediata partida da bomba, que já estava previamente configurada com a rotação desejada, bem como a câmara. O passo-a-passo para a realização do caso 2 pode ser observada na figura 4.11.

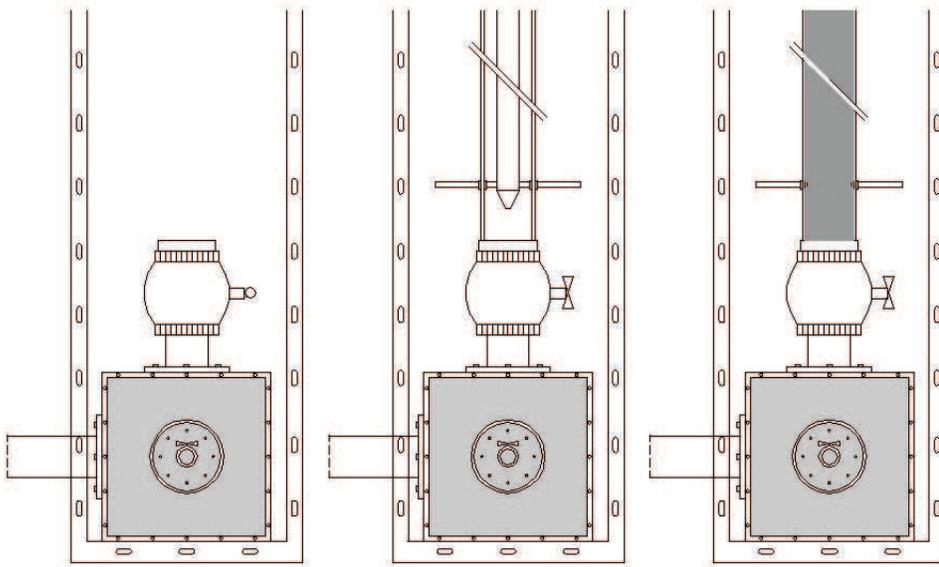


Figura 4.11: Procedimento experimental – Passo-a-passo – Caso 2

É importante mencionar que todos os passos de abrir e fechar válvula, iniciar e desligar a bomba eram manuais, não existindo qualquer controle automático. Por isso, era sempre necessária a presença de duas pessoas para realizar o teste.

Observando os fluidos ao final do teste, foi possível comprovar que a difusão entre os fluidos era de fato desprezível. Havia, nitidamente, regiões bem definidas - pretas (água) e transparentes (carbopol) - que permaneciam estáveis por muitos minutos, sem difundirem entre si.

Esse caso não apresentou resultados tão satisfatórios quanto os do caso 1. A abertura da válvula, instantes antes de iniciar o bombeio, também gerava perturbações na interface inicial. O deslocamento ficava comprometido, e com isso, houve falta de repetibilidade, sobretudo na condição de excentricidade nula ($\chi=1$).

Assim como no caso 1, foi montada a tabela 4.5 que mostra os valores adimensionais do número de Reynolds para cada teste.

Velocidade (m/s)	$\dot{\gamma}_c$ (1/s)	η_c - HB (Pa.s)	Re - HB	η_c - Carreau (Pa.s)	Re - Carreau	<i>We</i>
0,1524	6,096	0,275	27,62	0,179	42,57	57,96
0,3048	12,19	0,181	84,09	0,122	125,1	231,8
0,4572	18,29	0,142	161,2	0,100	228,9	521,6
0,6096	24,38	0,119	255,8	0,088	346,8	927,4

Tabela 4.5: Tabela de Número de Reynolds e Weber - Caso 2

É possível perceber uma grande diferença nos valores de viscosidade e por conseqüência no número de Reynolds obtidos com os dois modelos reológicos. Isso se deve ao mau ajuste de curva do modelo *Herschel-Bulkley* na faixa de taxa de cisalhamento em questão.

Mais uma vez os efeitos de tensão superficial podem ser desprezados tendo em vista o adimensional de referência, *We*, que assume valores bem maiores do que a unidade. Esse adimensional foi usado nesse momento porque *Re* assumiu valores maiores que a unidade.