

4

Resultados

4.1

Teste com óleo Lubrax GL5 Sae 140

Os primeiros testes nesta etapa do trabalho foram feitos com óleo Lubrax GL5 140 deslocando Carbopol 0,1%. Devido ao fato que a metodologia para a preparação do Carbopol ser complexa, pequenas mudanças no procedimento podem mudar os parâmetros do fluido, é necessário fazer a caracterização reológica de cada pote de fluido preparado.

Assim, os parâmetros obtidos na curva de escoamento da amostra de Carbopol utilizado nestes testes é apresentada na tabela 4.1.

Parâmetro	Valor
$k[Pa.s^n]$	1,2807
n []	0,4915
$\tau_0[Pa]$	3,8864

Tabela 4.1: Parâmetros reológicos do Carbopol 0,1 %

As propriedades do óleo são mostradas na Tab. 3.2.

O desafio nesta etapa da pesquisa consistiu na formação da interface plana (*plug*) entre o óleo e o Carbopol, já que, os testes realizados inicialmente apresentaram *fingers* e uma mistura dos fluidos na interface (fig.4.1), com características de escoamento totalmente disperso na interface descrito por Trallero (33).

No caso de um deslocamento imiscível envolvendo um fluido newtoniano sendo deslocado por um outro fluido newtoniano, a formação de *viscous fingering* ocorre quando o fluido deslocador é menos viscoso que o deslocado. Caso contrário, há formação de uma interface estável gerando um deslocamento do tipo *plug* (28). Porém, o deslocamento de fluidos viscoplásticos ainda não está bem definido, visto que a relação entre a velocidade e o gradiente de pressão, ou seja a Lei de Darcy para fluidos newtonianos, não pode mais ser usada.

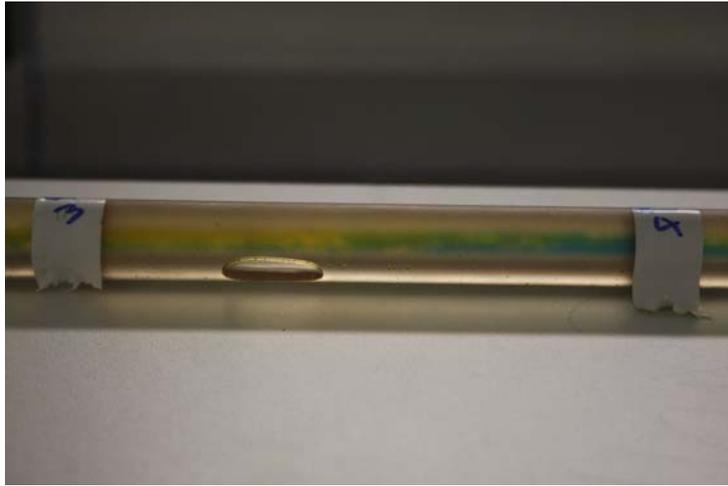


Figura 4.1: Formação de *finger* na interface Carbopol-óleo.

Além disso, a formação de *plug* é fortemente afetada pela superfície das paredes do escoamento. Sendo assim, é necessária uma superfície lisa a fim de conseguir a formação da interface plana, conforme o que acontece nas células de Hele-Shaw.

Conseqüentemente, como o Carbopol apresenta a máxima viscosidade no momento do reinício, foram realizados testes com o objetivo de conhecer as faixas de $\dot{\gamma}$ onde acontece o reinício, e assim obter a viscosidade aparente do fluido. Com a reologia do fluido, além da queda de pressão no tubo obtidas dos testes experimentais, foram calculados a tensão na parede (τ_R) com a eq.2-6 e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) com a eq.2-21.

Conhecida a taxa de cisalhamento, foi obtida a viscosidade aparente, calculada como a razão entre a tensão limite de escoamento (τ_0) e a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$). Assim, a viscosidade do Carbopol foi considerada na faixa de $1,67 Pa.s$. A notável diferença entre as viscosidades dos fluidos poderia ocasionar a formação de *fingers*, já que, o óleo tem uma viscosidade de $0,5636 Pa.s$.

4.2

Teste com óleo Lubrax MO ISO 3200 e Carbopol 0.1

Com o objetivo de minimizar a ocorrência de *finger*, foi necessário aumentar a viscosidade do fluido deslocador. Sendo assim, o fluido newtoniano com maior viscosidade achado no mercado foi o óleo marca Lubrax MO 3200.

As características como a densidade e viscosidade em $20^\circ C$ e $25^\circ C$ foram obtidas no LCF são apresentadas na Tab.4.2.

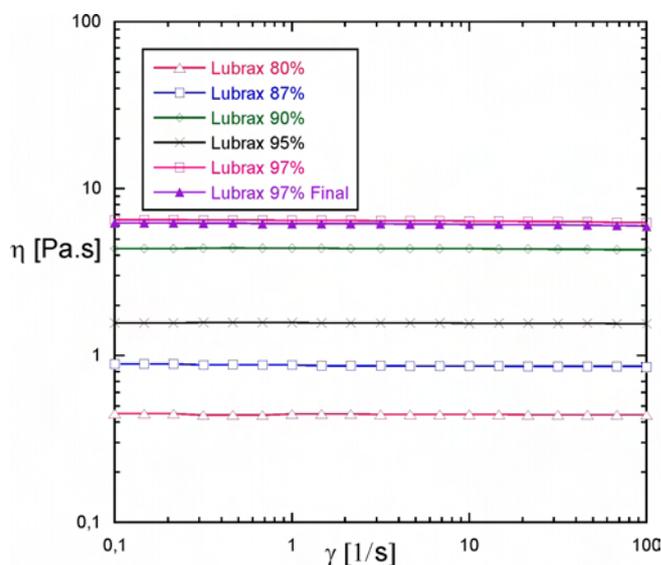
A elevada viscosidade do óleo a $20^\circ C$ poderia entupir a seção de teste, já que, a pressão para deslocá-lo poderia ultrapassar a capacidade do circuito

Temperatura [$^{\circ}C$]	Densidade [Kg/m^3]	Viscosidade [$Pa.s$]
20	953.8	20.448
25	949.6	12.048

Tabela 4.2: Viscosidade óleo Lubrax MO3200

hidráulico. Sendo assim, o óleo foi diluído em querosene marca Lubrax. Na figura 4.2 pode-se observar o comportamento da viscosidade do óleo, conforme a variação na concentração de querosene.

Neste caso os testes foram realizados com a concentração de 97% de óleo, obtendo uma viscosidade de $6,25 Pa.s$.

Figura 4.2: Viscosidade óleo Lubrax MO3200 diluído com querosene a $25^{\circ}C$.

Foram feitos os testes com a nova concentração de óleo. Com o aumento da viscosidade do fluido deslocador a interface formada pelo óleo e o Carbopol melhorou notavelmente. Neste caso, obteve-se uma boa interface na mangueira de plástico antes do tubo de resina (Fig. 4.3), mas devido à irregularidade da parede interna do tubo a interface não se mantém igual.



Figura 4.3: Interface formada na mangueira antes da entrada ao tubo de resina.

No momento da entrada do óleo ao tubo, pequenas bolhas de óleo penetraram o Carbopol ficando flutuando nele (fig. 4.4), o que pode ser ocasionado pela superfície rugosa do tubo, ou pela diferença nas densidades dos fluidos ou pela tensão interfacial. Porém, considerou-se que devido a que não houve mistura total dos fluidos na interface (fig. 4.4), os testes de reinício foram realizados.



Figura 4.4: Inteface formada no tubo de resina.

Assim, os resultados dos testes realizados com o óleo viscoso, evidenciaram mais um problema no escoamento. Na figura 4.5 pode-se observar o comportamento da pressão na válvula ITV que controla a entrada de ar no sistema, descrito pela curva vermelha, e a curva azul representa a resposta de queda de pressão ao longo do tubo de resina.

Foi realizado o teste na opção de rampa com controle de massa, sendo aumentada a pressão com uma inclinação de $0,05 \text{ Bar/s}$. A figura 4.5 mostra como a pressão na ITV e no transdutor aumenta até o momento que a balança tem o primeiro registro de massa, tempo no qual a pressão na ITV mantém-se constante.

Porém, o aumento da queda de pressão no tubo depois do reinício do escoamento, evidencia a influencia da viscosidade do fluido deslocador no escoamento. Devido a que a viscosidade do fluido deslocado é muito menor que a viscosidade do fluido deslocador. Esta diferença não vai influenciar os dados finais de pressão de reinício, mas não faz sentido com a realidade, já que, o fluido que esta entupindo o duto, não será deslocado por um fluido de maior viscosidade.

Conseqüentemente, foi mudada novamente a viscosidade do óleo até $0,45 \text{ Pa.s}$. As características dos fluidos utilizados são apresentadas na tabela 4.3, sendo ρ , a densidade, μ , a viscosidade newtoniana, σ , a tensão superficial.

Uma estimativa do valor da tensão interfacial, σ , entre o óleo e o Carbopol 0,1% foi baseada na lei de Antonoff (7). Assim, $\sigma_{21C} = 42.152$.

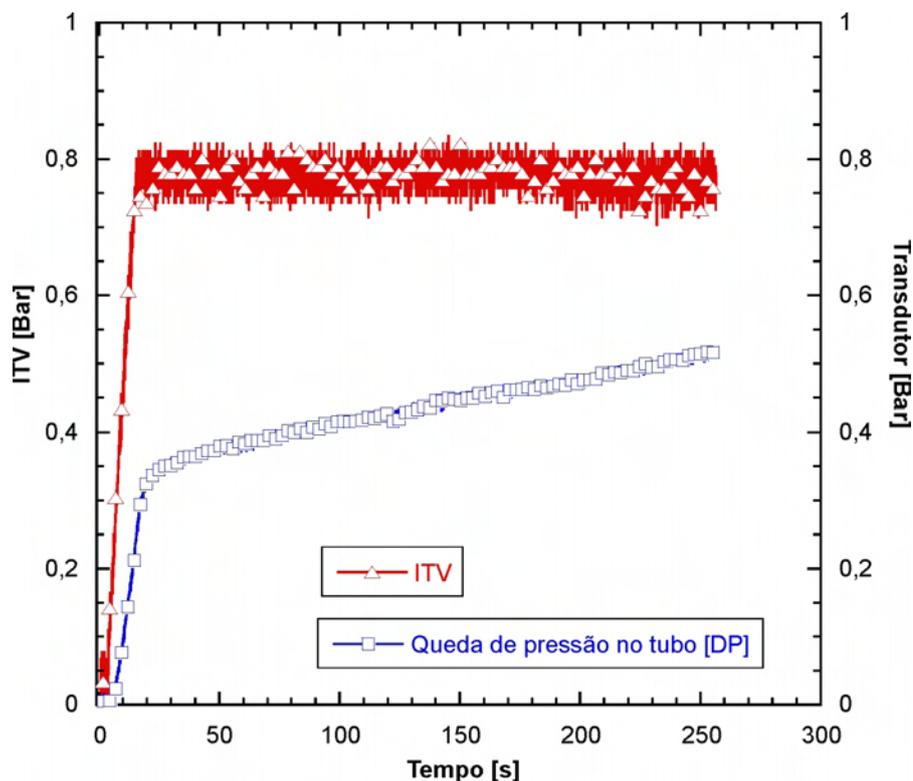


Figura 4.5: Comportamento pressões no reinício de deslocamento.

Fluido	T [°C]	μ [Pa.s]	ρ [Kg/m ³]	σ [mN.m]
Lubrax	21	0,45	925,8	20.448
Carbopol	21	---	999,5	62,6

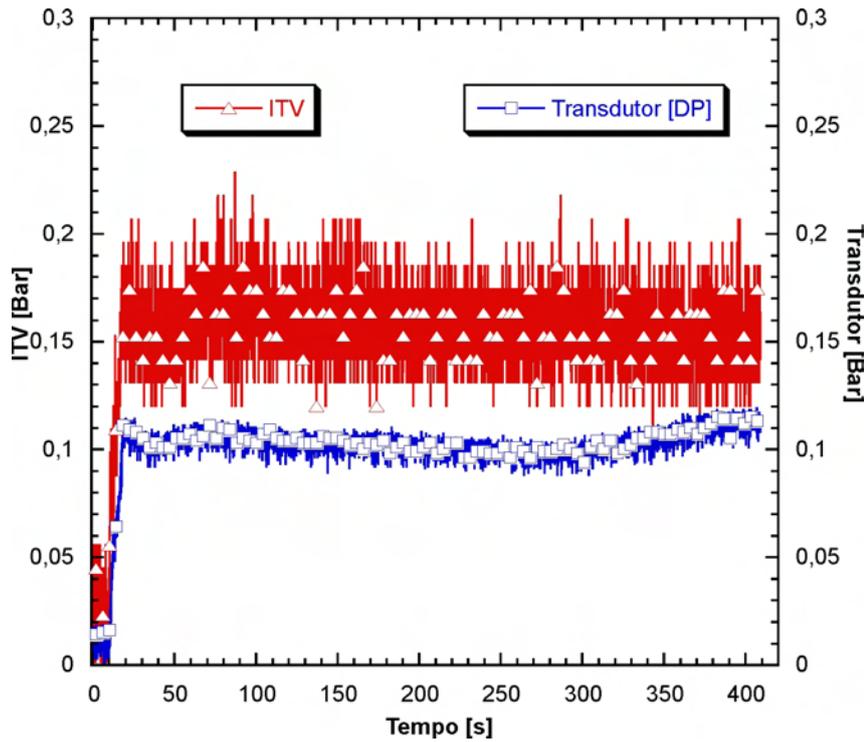
Tabela 4.3: Características do Carbopol 0,1% e Lubrax MO3200 em 21° C

A Tabela 4.4 a seguir, mostra os parâmetros reológicos da amostra do Carbopol 0,1% utilizado nos testes.

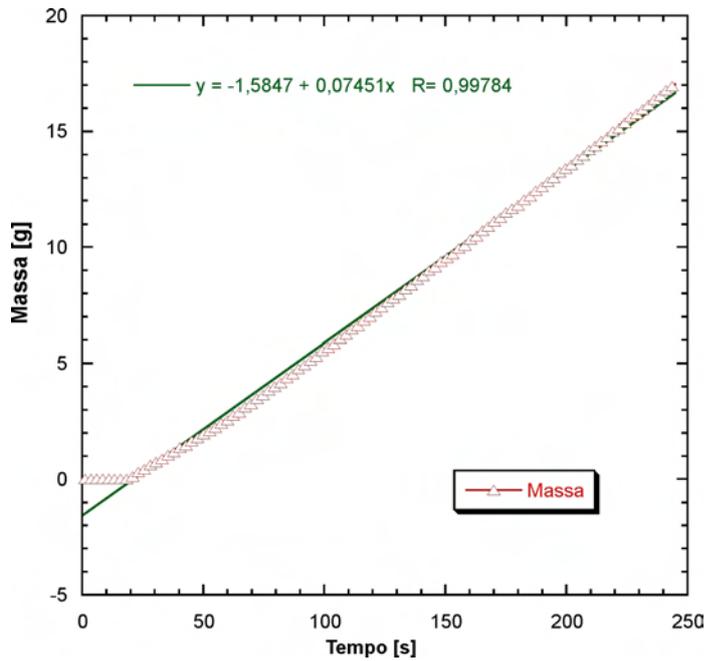
Parâmetro	Valor
k [Pa.s ⁿ]	1,1339
n []	0,4812
τ_0 [Pa]	3,672

Tabela 4.4: Parâmetros reológicos do Carbopol 0,1 amostra B%

Na Figura 4.7a e 4.7b pode-se observar a queda de pressão e o deslocamento de massa ao longo do tubo desde o reinício do escoamento, com a interface colocada no início do tubo até que o Carbopol é deslocado totalmente. A fig. 4.7a mostra o efeito da diminuição da viscosidade do óleo descrito pela curva azul, que representa a queda de pressão no tubo, que neste caso, não aumenta conforme a interface avança no tubo.



4.6(a): Comportamento da queda de pressão depois do reinício do escoamento.

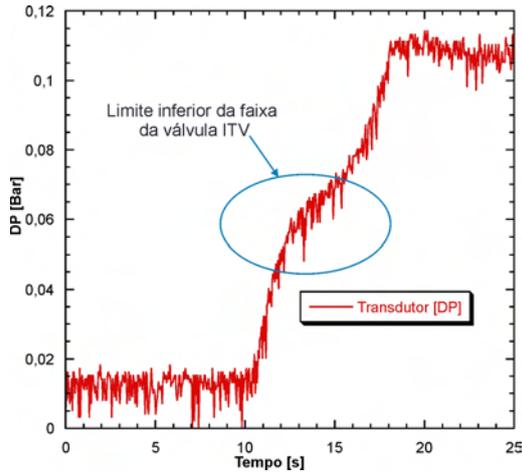


4.6(b): Vazão.

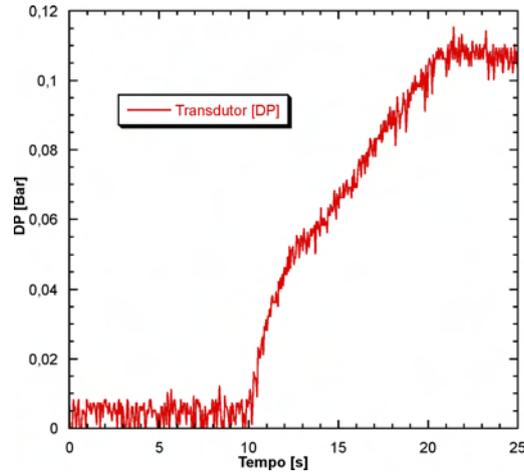
Figura 4.6: Queda de pressão ao longo do tubo e vazão.

Assim, realizaram-se testes na opção de rampa, com duas inclinações, $\theta = 0,01 \text{ Bar/s}$ e $\theta = 0,001 \text{ Bar/s}$. Além disso, foram realizados para a segunda inclinação de $0,001 \text{ Bar/s}$, testes deslocando a interface até a metade do tubo, com o objetivo de avaliar o (τ_R) .

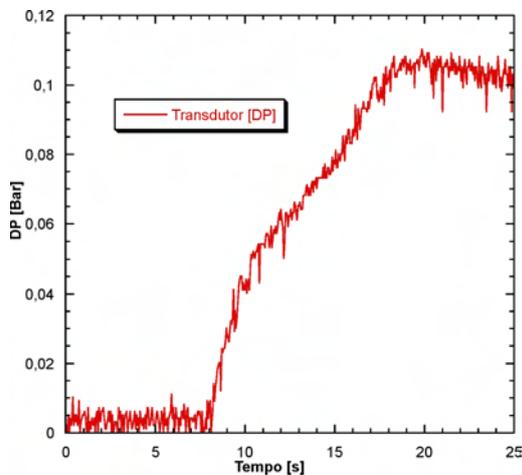
Nas Figura 4.7, pode-se observar o comportamento da pressão antes e



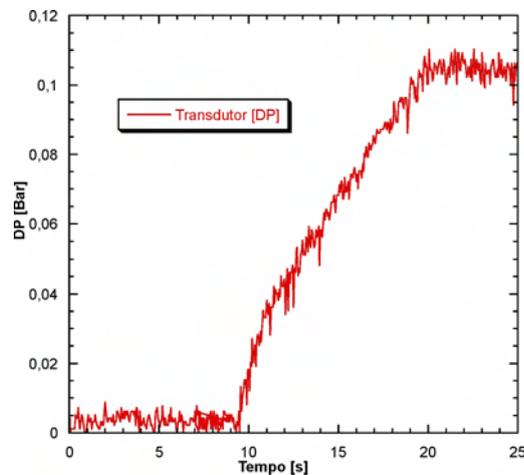
4.7(a): Teste 1.



4.7(b): Teste 2.



4.7(c): Teste 3.



4.7(d): Teste 4.

Figura 4.7: Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,01\text{Bar}/s$.

depois do reinício com uma inclinação $\theta = 0,01\text{Bar}/s$. O eixo x contém o tempo do teste em segundos, e o eixo y contém a queda de pressão lida pelo transdutor de pressão em Bar. O teste começa em $t=0s$, quando é imposto uma rampa de pressão com inclinação de $0,01\text{ Bar}/s$

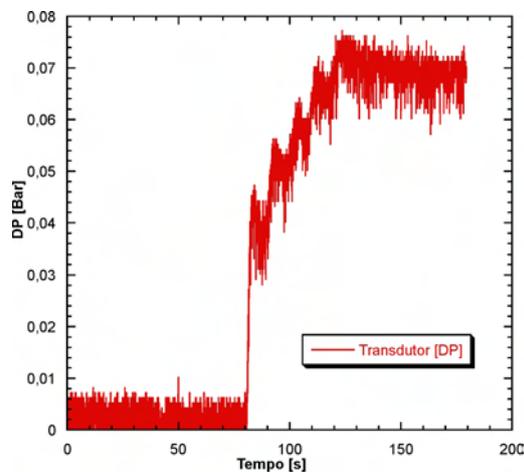
Entretanto, pode-se observar na Fig.4.7 um pico de pressão entre 0 e 0,05 Bar. Isto ocorre em função da faixa de atuação da válvula ITV ser limitado os valores de pressão entre 0,05 e 9 Bar. valores abaixo de 0,05 bar estão fora da faixa de linealidade do transdutor e apresentam erro. Sendo, assim, os testes não começam em $P=0$, mas sim em $P=0,05\text{ Bar}$.

A pressão de reinício obtida nos testes encontra-se na faixa dos 0,11 Bar e o tempo que demorou para o fluido quebrar está em torno dos 20s em todos os testes, o que mostra uma boa repetitividade na obtenção de dados.

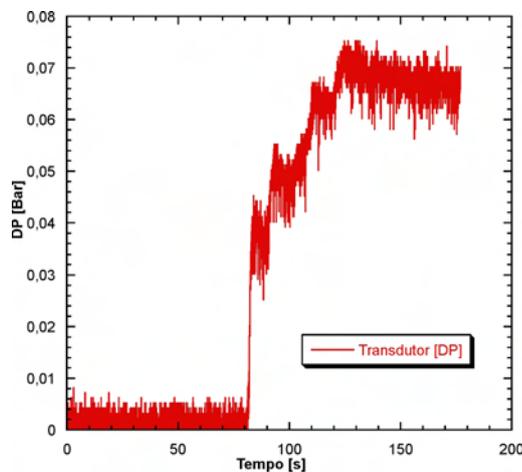
A tensão na parede é calculada a partir da equação 2-6, a qual é mostrada na tabela 4.5. Evidencia-se, que o valor da tensão na parede obtida através

dos testes experimentais encontra-se abaixo do mostrado na tabela 4.4.

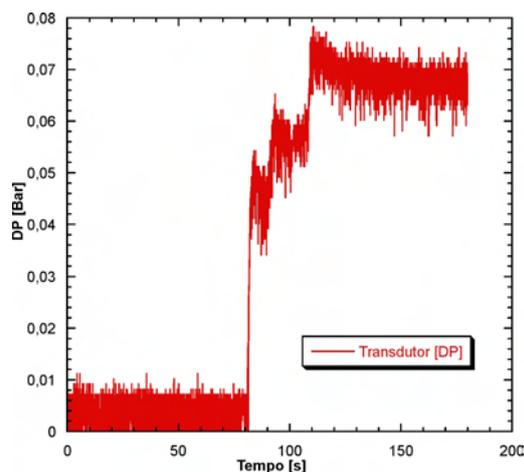
Realizaram-se outra série de testes mudando a inclinação da rampa para $0,001\text{Bar}/s$. As curvas são apresentadas na figura 4.8 a seguir.



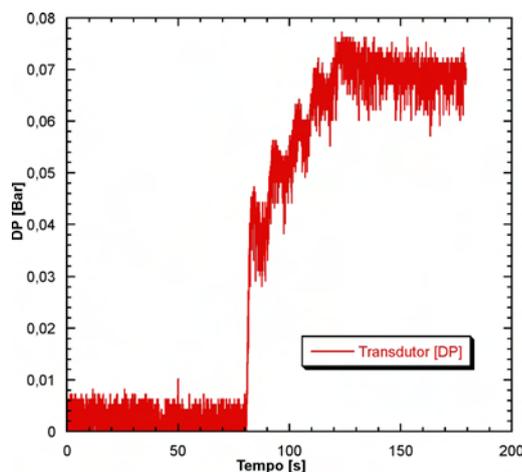
4.8(a): Teste 1.



4.8(b): Teste 2.



4.8(c): Teste 3.



4.8(d): Teste 4.

Figura 4.8: Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,001\text{Bar}/s$.

Os resultados mostraram que de forma similar ao que aconteceu nos testes com $0,01\text{Bar}/s$, a pressão mantém-se em zero inicialmente e aproximadamente em $t=80s$, houve um pico de pressão até atingir a faixa da válvula, em $0,05\text{Bar}$. A seguir, os picos apresentados nas curvas de pressão, são devidos ao nível de exatidão da válvula ITV, que tem 2 casas decimais. Ou seja, a pressão aumenta de um valor inicial $t=x$, enquanto a válvula aumentar de $0,001\text{Bar}$ até atingir $0,01$, isto é, $0,001-0,002-0,003\dots-0,009-0,01$, que ocorre em $10s$, a pressão mantém-se relativamente constante.

A pressão calculada com a equação 2-6, encontra-se em torno de $3,4\text{Pa}$, e o tempo de quebra em $120s$. Além dos testes colocando na interface no início do tubo de resina, foram realizados nesta série, testes com a interface colocada

na metade do tubo, como o objetivo de analisar o comportamento da pressão de reinício com a mudança na localização da interface.

O resumo do tempo e pressão de quebra, com inclinações de 0,01 e 0,001, além dos resultados mudando a localização da interface (0.001-L2), pode-se observar na tabela 4.5, a seguir.

Teste #	$\theta = 0,01$		$\theta = 0,001$		$\theta = 0,001 - L2$	
	τ_R [Pa]	T [s]	τ_R [Pa]	T [s]	τ_R [Pa]	T [s]
1	5,219	18	3,435	122	2,449	86
2	5,312	20	3,341	118	2,496	94
3	5,312	20	3,482	118	2,547	93
4	5,412	19	3,416	114	2,423	93

Tabela 4.5: Resultados de testes realizados com $\theta = 0.01, 0.001$ e 0.001 mudando a localização da interface

Na tabela anterior 4.5, pode-se observar como a mudança na inclinação de 0,01 Bar/s para 0,001 Bar/s influencia a tensão cisalhante na parede do tubo obtida nos testes. Com uma maior inclinação, o τ_R aumenta em torno de 52% e o tempo de quebra se diminui em 85%. Isto deve-se a efeitos de acomodação da microestrutura do material.

Com uma velocidade de aplicação de pressão maior, a estrutura do material não tem tempo de se recompor, precisando uma pressão de quebra maior. Por sua vez, com a diminuição da inclinação da pressão, a estrutura do material tem tempo de se acomodar. Assim, com o objetivo de obter dados mais concordantes com a tensão limite de escoamento obtida através da reologia, precisa-se de uma inclinação o menor possível, realizando testes com uma duração de dias ou semanas antes da quebra do material, sendo este parâmetro limitante do instrumento de medição utilizado para controlar a pressão de entrada ao circuito hidráulico ou válvula ITV.

Embora a válvula ITV não tenha um bom nível de precisão, os dados de τ_R obtidos com a inclinação de 0.001 Bar/s, apresentaram boa concordância comparados com a tensão limite obtida através da reologia. Neste caso, pode-se dizer que o τ_R obtido em testes experimentais encontra-se na faixa entre 3,3 e 3,4 Pa. Na realidade não é aconselhável falar de um valor fixo de tensão limite de um fluido, sendo que, os dados obtidos em reômetros ou em bancadas experimentais, serão limitados pela capacidade do instrumento de medição. Isto é, o τ_0 obtido em um reômetro, é diferente do que o τ_0 obtido em outro reômetro com maior exatidão.

Dos resultados do tempo de quebra e da tensão de cisalhamento na parede do tubo obtida nos testes, pode-se dizer que para o reinício de escoamento em uma tubulação com Carbopol 0,1% sendo deslocado por óleo com as propriedades já mencionadas, para uma diminuição do tempo de reinício de escoamento de 85%, precisa-se de um aumento na capacidade de bombeamento aproximadamente de 52%.

Por sua vez, a tabela 4.5 mostra os efeitos na pressão de quebra do Carbopol com a interface dos fluidos colocada na metade do tubo (0.001-L2) antes do reinício. Esta mudança na posição da interface, causa uma diminuição da pressão de quebra é de 41%, em comparação com a tensão obtida com a interface colocada no início do tubo.

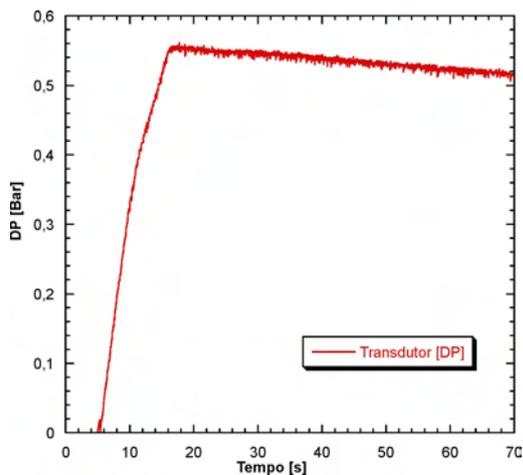
4.3

Teste com óleo Lubrax MO ISO 3200 e Carbopol 0,15

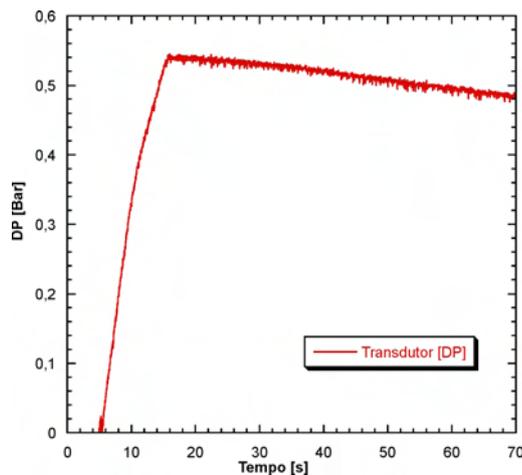
Uma nova série de testes foram realizados, neste caso, mudando a concentração do Carbopol para 0,15% com parâmetros reológicos mostrados na Tab. 4.6 e conservando a viscosidade do óleo. Assim, as inclinações estudadas foram de 0,05, 0.01 e 0.001 Bar/s. Com a mudança na concentração do Carbopol, houve mais dificuldade para formar uma interface estável, porém, conseguiu-se com a mudança de alguns passos do procedimento utilizado para concentração de Carbopol 0,1%, uma interface certa, semelhante com a obtida em testes anteriores.

Parâmetro	Valor
$k [Pa.s^n]$	6,1975
n []	0,4137
$\tau_0 [Pa]$	19,85

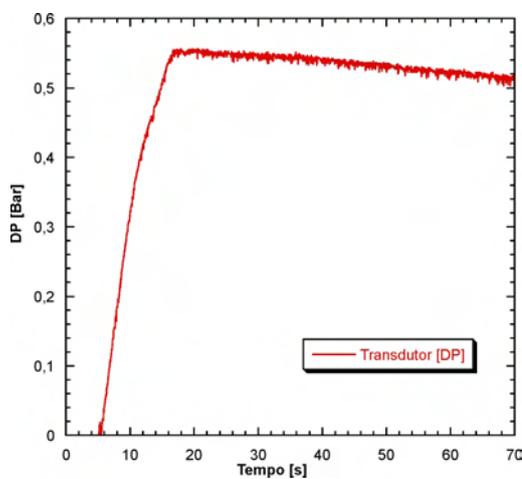
Tabela 4.6: Parâmetros reológicos do Carbopol 0,15 %



4.9(a): Teste 1.



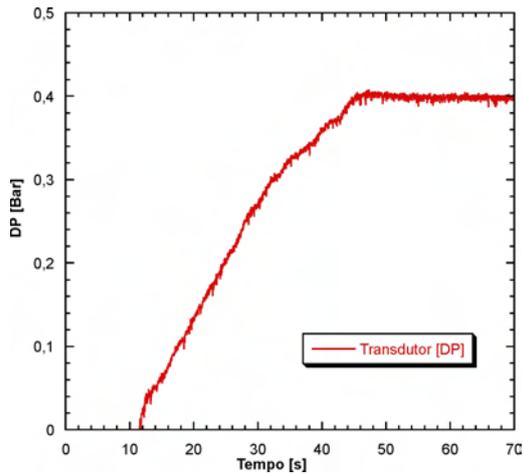
4.9(b): Teste 2.



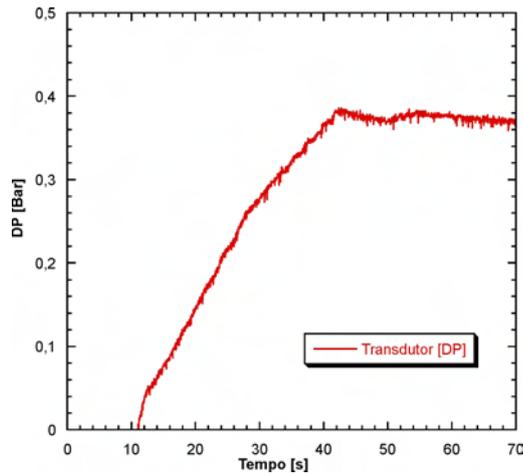
4.9(c): Teste 3.

Figura 4.9: Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,05 \text{ Bar/s}$.

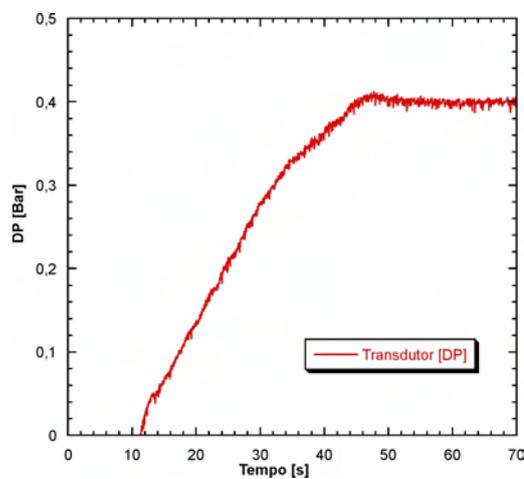
Na Figura 4.9 pode-se observar as curvas de reinício com Carbopol 0,15% e com o $\theta = 0,05$ de inclinação. Nesta série, a tensão de cisalhamento na parede encontra-se na faixa de 25 Pa, e o tempo de quebra da estrutura está em torno de 20s. A tab. 4.7 mostra o resumo dos resultados.



4.10(a): Teste 1.



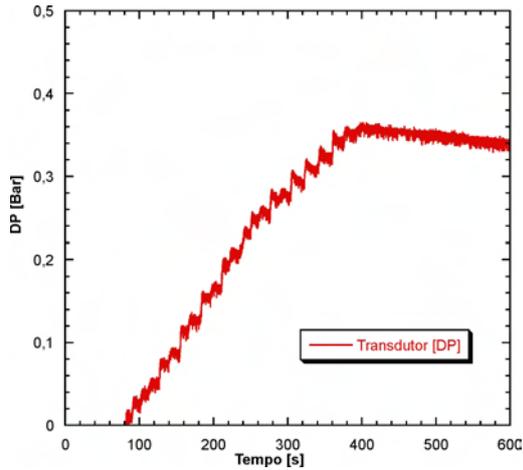
4.10(b): Teste 2.



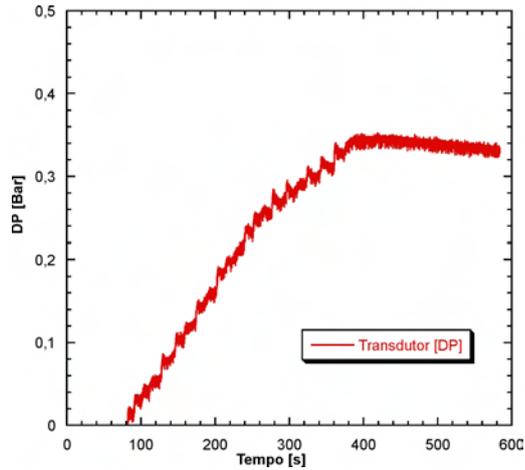
4.10(c): Teste 3.

Figura 4.10: Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,01 \text{ Bar/s}$.

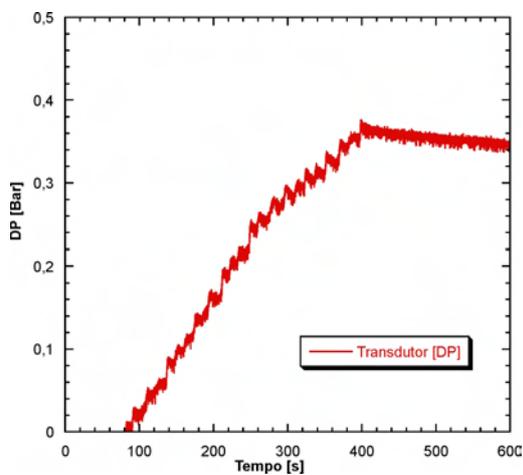
Com o $\theta = 0,01$ obtém-se um τ_R ao redor de 18 Pa, e o tempo de quebra de 40s.



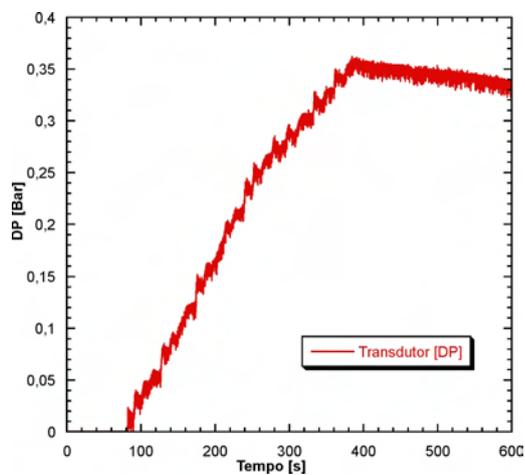
4.11(a): Teste 1.



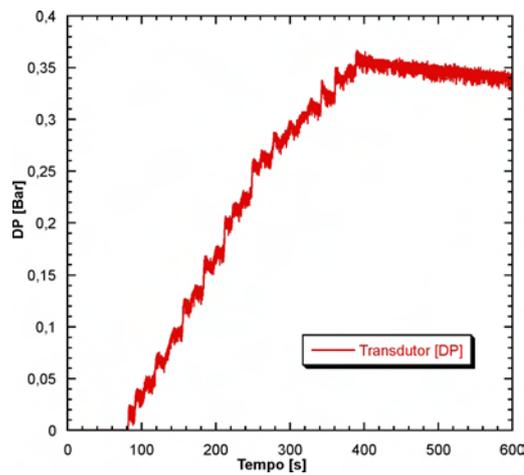
4.11(b): Teste 2.



4.11(c): Teste 3.



4.11(d): Teste 4.



4.11(e): Teste 3.

Figura 4.11: Pressão antes e depois do reinício com inclinação $\theta = 0,001\text{Bar/s}$.

Com o $\theta = 0,001$ obtém-se um τ_R ao redor de 16 Pa, e o tempo de quebra de 400s.

Os resultados dos testes evidenciaram novamente a influência da in-

Teste #	$\theta = 0,05$		$\theta = 0,01$		$\theta = 0,001$	
	τ_R [Pa]	T [s]	τ_R [Pa]	T [s]	τ_R [Pa]	T [s]
1	25,96	15,4	18,42	44,3	16,38	385,3
2	25,35	14,6	17,90	41,3	16,24	396,1
3	25,82	15,5	18,50	44,8	16,62	394,0
4	–	–	–	–	16,72	385,8
5	–	–	–	–	16,83	391,1

Tabela 4.7: Resultados de testes realizados com $\theta = 0.05, 0.01$ e 0.001

clinação na obtenção pressão de reinício do Carbopol.

Entre os dados obtidos com $0,05$ Bar/s e $0,01$ Bar/s obteve-se uma diferença máxima de 44% , em quanto a diferença máxima entre os resultados de $0,01$ e $0,001$ foi de $13,9\%$. Esta redução no dado obtido da tensão de cisalhamento na parede do tubo obedece novamente à influencia dos efeitos da acomodação do material.

Nesta série, obteve-se a melhor concordância com os dados obtidos através da reologia inclinação intermédia testada, isto é, com $\theta = 0,01$ Bar/s, devido que a tensão limite de escoamento obtida no reômetro para esta concentração de Carbopol foi de $20,277$ Pa. Esta diferença nas faixas de inclinação obtenção do τ_R , pode-se dever a que a diferença de viscosidades dos fluidos nestes testes é muito maior do nos testes realizados com Carbopol $0,1\%$.

Conforme a análise realizada com testes anteriores, comparando a inclinação $0,05$ - $0,01$ Bar/s e $0,01$ - $0,001$ Bar/s. Pode-se concluir que para o reinício de escoamento em uma tubulação com Carbopol $0,15\%$ sendo deslocado por óleo com as propriedade já mencionadas, para uma diminuição do tempo de reinício de escoamento de 44% , vai-se precisar de um aumento na capacidade de bombeamento aproximado de 29% (comparando entre $0,05$ e $0,01$ Bar/s).

Por sua vez, com os dados de $0,01$ e $0,001$, obtém-se que para diminuir o tempo de quebra em 89% tem-se que aumentar a capacidade de pressão em $12,2\%$. Os anteriores estimativas foram calculadas com os valores máximos de cada série de teste, isto é, o tempo foi calculado com diferencia máxima encontrada entre as inclinações, assim como a tensão cisalhante na parede do tubo.