

4

Propriedades Reológicas do Fluido de Perfuração Utilizado

4.1.

Introdução

Neste Capítulo será apresentada uma breve classificação dos fluidos viscosos, dando ênfase ao modelo de Herschell-Buckley adotado para representar o fluido de perfuração utilizado nesta dissertação. Serão apresentados também os equipamentos utilizados e o modo de preparação do fluido, bem como o software (SIMCARR[®] 6) utilizado para realizar as análises dos ensaios. Estes ensaios foram realizados com equipamentos específicos adquiridos pelo Laboratório de Interação Rocha-Fluido/GTEP da PUC-Rio. A busca na literatura para se conhecer a classificação e modelo de fluidos foram de suma importância para a determinação das propriedades reológicas do fluido real utilizado. Os parâmetros reológicos na indústria de petróleo, mais especificamente durante a escolha do fluido de perfuração, vão influir diretamente no cálculo de perdas de carga na tubulação e velocidade de transporte dos cascalhos.

4.2.

Classificação dos Fluidos Viscosos

Segundo Machado (2002), a representação gráfica, ou seja, a curva de fluxo mostra como a tensão cisalhante varia em função da taxa de cisalhamento, e esta define o comportamento reológico dos fluidos viscosos, sendo a equação matemática entre estas duas variáveis conhecida como equação de fluxo. Os fluidos viscosos podem ser caracterizados também através da relação entre a viscosidade e a taxa de cisalhamento chamada de curva de viscosidade.

Os fluidos viscosos podem ser classificados em fluidos *Newtonianos* e *não Newtonianos*. Os fluidos *Newtonianos* apresentam como principal característica a proporcionalidade entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento em regime laminar. Desta forma, sua representação gráfica é uma reta com início na origem

dos eixos, portanto a sua viscosidade é única. Através da representação gráfica da relação entre viscosidade e taxa de cisalhamento, esta relação é uma reta paralela ao eixo das taxas de cisalhamento, pois sua viscosidade é constante. A equação matemática para os fluidos *Newtonianos* é:

$$\tau = \mu\gamma \quad (4.1)$$

Onde;

τ = Tensão cisalhante;

μ = Viscosidade dinâmica absoluta;

γ = Taxa de cisalhamento.

Os exemplos mais comuns de fluidos *Newtonianos* são a água, o ar, o óleo, as soluções salinas, a glicerina, etc. Para os fluidos *não Newtonianos*, a relação entre a tensão cisalhante e a taxa de cisalhamento não é constante, em escoamento laminar. Para se classificar este tipo de fluido, deve-se observar o aspecto da curva de fluxo e verificar em qual modelo matemático este fluido melhor se encaixa. Diferente dos fluidos *Newtonianos*, os *não Newtonianos* não apresentam a viscosidade constante. Ela varia com a magnitude da taxa de cisalhamento e deve vir acompanhada da taxa de cisalhamento correspondente e é chamada de viscosidade aparente. Os fluidos *não Newtonianos* são largamente utilizados na indústria de Petróleo, como por exemplo, em operações de perfuração e completção de poços.

Os modelos mais usuais apresentados na literatura são: Modelo de Bingham ou plástico ideal, Modelo de Ostwald de Waale ou fluido de potência, Modelo de Herschell-Buckley também conhecido como fluido de potência com limite de escoamento ou fluido de potência modificado, Modelo de Casson e Modelo de Robertson-Stiff.

Nesta dissertação será descrito o Modelo de Herschell-Buckley, pois trata-se do modelo mais adequado ao fluido de perfuração estudado, ficando assim a cargo do leitor mais interessado em se aprofundar nos demais modelos de reologia de fluidos, recorrer a uma literatura mais específica como Machado (2002), Bourgoyne *et al.* (1986) e Whittaker (1985).

O Modelo de Herschell-Buckley é representado pela Equação 4.2. Este modelo é considerado o mais completo em comparação aos demais modelos, uma vez que a sua equação engloba três parâmetros, a saber: τ_0 , denominado de limite de escoamento real, K_c , denominado de índice de consistência que indica o grau de resistência do fluido diante do escoamento e n_c , denominado de índice de comportamento e indica fisicamente o afastamento do fluido do modelo *Newtoniano*, ou seja, se o seu valor se aproxima de um, então o fluido está próximo do comportamento *Newtoniano*.

$$\tau = K_c(\dot{\gamma})^{n_c} + \tau_0 \quad (4.2)$$

O valor de τ_0 é estimado por extrapolação através do gráfico de tensão cisalhante (τ) versus taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) em coordenadas cartesianas e o valor de K_c e n_c através de um gráfico de $(\tau - \tau_0)$ versus $\dot{\gamma}$, em coordenadas logarítmicas. No caso desta dissertação os valores destes parâmetros foram obtidos por meio do software SIMCARR[®] 6, que será descrito mais adiante.

Segundo Machado (2002), o Modelo de Herschell-Buckley representa adequadamente as dispersões de argila com polímeros, empregadas amplamente na indústria do petróleo como fluidos de perfuração, as graxas e pastas de cimento.

4.3. Preparação dos Fluidos Utilizados nesta Dissertação

Para realização dos ensaios foi utilizado um fluido base água, com componentes normalmente presentes em fluidos reais de perfuração como: a goma xantana (polímero utilizado como viscosificante, usado normalmente por sua capacidade de carregamento e suspensão de “cuttings”), HPA (“hydrolysed polyacrylamide”), que é um amido, utilizado como redutor de filtrado e um bactericida utilizado para eliminar o possível surgimento de bactérias no fluido. Para preparação do fluido foram utilizados bomba de vácuo, agitador magnético, kitazato e um aparelho de dispersão do tipo Hamilton Beach – Fann (Figura 4. 1).



Figura 4. 1 - Misturador Hamilton Beach - Fann

Foi sugerido pelo CENPES-Petrobras concentrações de $7,13 \text{ kg/m}^3$ (2,5 lb/bbl) de goma xantana, $17,12 \text{ kg/m}^3$ (6,0 lb/bbl) de HPA e 1,42 a $2,85 \text{ kg/m}^3$ (0,5 a 1 lb/bbl) de bactericida, estas concentrações são normalmente utilizadas pela indústria.

Para preparação do fluido nestas concentrações procede-se da seguinte forma:

1. Pesa-se 2,5 g de goma xantana e 6,0 g de HPA numa balança de precisão com três casas decimais;
2. Adiciona-se 350 ml de água deionizada no copo metálico do aparelho de dispersão;
3. Com as quantidades de aditivos pré-estipuladas devidamente pesadas, adiciona-se lentamente a goma xantana no copo metálico e agita-se por 10 min;
4. Em seguida, adiciona-se HPA e agita-se por 20 min;
5. Por fim coloca-se de 0,5 a 1,0 g de bactericida e agita-se por mais 5 minutos.

Na preparação deste fluido há incorporação de ar, sendo necessário uma deaeração para utilização no ensaio de difusão. Para isso, coloca-se em cima de um agitador magnético um kitazato com o fluido produzido e aplica-se vácuo no sistema. Ao fim deste processo o fluido já poderá ser inserido na interface para realização do ensaio de difusão. Para preparação do fluido contendo soluções salinas, a metodologia de preparação é a mesma, substituindo-se somente a água

pura pela solução salina desejada. Na Figura 4. 2 pode-se observar o fluido devidamente preparado.



Figura 4. 2 - Fluido goma xantana, HPA e bactericida

4.4. Metodologia de Ensaio e Análise das Propriedades Reológicas dos Fluidos

Segundo Machado (2002), viscosimetria consiste na prática experimental de medir a resposta reológica dos fluidos, considerados puramente viscosos, onde a componente elástica pode ser desprezada. Para medir as grandezas físicas, tais como velocidade angular, torque, ângulo de deflexão, tempo, etc., utiliza-se instrumentos ou equipamentos denominados viscosímetros ou reômetros. As grandezas físicas obtidas nestes equipamentos podem ser transformadas em unidades de tensão e de taxa de cisalhamento, conseqüentemente, de viscosidade. Por fim determina-se a viscosidade ou os parâmetros viscosos considerando-se um certo modelo, ou então, através da construção ou interpretação das curvas de fluxo e de viscosidade. Os viscosímetros são instrumentos de aplicação mais limitada, pois medem apenas os parâmetros viscosos do fluido, sob cisalhamento contínuo, já os reômetros medem as propriedades viscoelásticas de sólidos, semi-sólidos e fluidos.

Para os ensaios descritos a seguir utilizou-se o viscosímetro Fann 35A (Figura 4. 3). Este viscosímetro é baseado no projeto original da Socony-Mobil

Oil Company, cuja intenção era medir as viscosidades aparente e plástica e o limite de escoamento dos fluidos de perfuração nos campos de petróleo.



Figura 4. 3 - Viscosímetro Fann 35A

Este instrumento trabalha com taxa de cisalhamento controlada, o cilindro externo de raio $r_2 = 1,84 \times 10^{-2}$ m gira a uma velocidade constante, pré-selecionada, enquanto o cilindro interno “bob” de raio $r_1 = 1,72 \times 10^{-2}$ m fica estático. O “bob” sofre uma força de arraste, que é função da velocidade de fluxo e da viscosidade do fluido, e é transmitida pelo fluido. O “bob” se conecta a uma mola de torção através de um eixo, que se apoia na parte superior girando livremente através de um sistema de rolamentos. A constante K_m desta mola é igual a $3,87 \times 10^{-5}$ N.m/grau (387 dina.cm/grau). A velocidade de rotação N é controlada através de um sistema de engrenagens e motor e pode variar conforme os valores 3, 6, 100, 200, 300 e 600 rpm. Os parâmetros de construção ou de projeto do instrumento utilizado foram a combinação geométrica (R1-B1-F1, rotor-bob-torsion), que significa o raio do cilindro externo (rotor), raio do cilindro interno “bob” e a mola de torção de constante $K = 3,87 \times 10^{-5}$ N.m/grau, respectivamente. No viscosímetro rotativo Fann não se formam turbulências causadas por forças centrífugas. As faixas de tensão e taxa de cisalhamento estão bem definidas. A calibração da mola pode ser feita pelo operador, necessitando apenas de fluidos padrões de referência ou com um acessório de calibração vendido separadamente pelo fabricante.

A metodologia proposta para os ensaios, realizada com apoio técnico do CENPES-Petrobras, é apresentada a seguir. Futuramente, os ensaios com os fluidos serão realizados também com controle de temperatura, pois o Laboratório de Interação Rocha-Fluido/GTEP da PUC-Rio possui o equipamento Roller Oven, indicado para este tipo de controle.

1. Colocar o “bob” no interior do cilindro externo (rotor), empurrando-o para cima e ao mesmo tempo girando-o no sentido horário;
2. Verificar se a leitura no mostrador (Figura 4. 4), localizado na parte superior do instrumento, encontra-se zerada, se não, realizar pequenos ajustes no “bob” até que se obtenha a leitura na marca zero;
3. Colocar o fluido de interesse para o ensaio no copo reservatório metálico, até a quantidade marcada (cerca de 350 cm³);
4. Colocar o copo reservatório na plataforma móvel elevando-o até que o fluido alcance a marca localizada na parte superior do rotor, imergindo assim o rotor e o “bob” na profundidade apropriada;
5. Agitar o fluido de interesse para o ensaio a velocidade de 600 rpm durante 1 minuto;
6. Efetuar a leitura da deflexão θ a 600 rpm;
7. Repetir o procedimento dos itens 5 e 6 para as leituras a 300 rpm, 200 rpm, 100 rpm, 6 rpm e 3 rpm, anotando-as.

Através das deflexões lidas (θ), pode-se calcular a tensão cisalhante, a taxa de cisalhamento e a viscosidade aparente. O valor da tensão de cisalhamento (τ), em Pascal é obtido pela Equação 4.3 abaixo:

$$\tau = 0,51. \theta \quad (4.3)$$

Os valores de taxa de cisalhamento (γ) em s⁻¹ são obtidos segundo a Equação 4.4:

$$\gamma = 1,703.N \quad (4.4)$$

Onde,

N = Velocidade de rotação.

Após estes cálculos, plota-se um gráfico com os valores obtidos para (τ) e os valores de (γ), em escala log-log. Através da melhor reta ajustada pelo método dos mínimos quadrados determina-se o coeficiente linear (b) e o coeficiente angular

que representa o índice de comportamento (n_c). Por fim calcula-se o índice de consistência K_c , conforme a Equação 4.5:

$$K_c = 10^b \cdot 1000 \quad (4.5)$$

O cálculo da viscosidade pode ser obtido pela Equação (4.6) mostrada mais adiante.



Figura 4. 4 - Detalhe do mostrador para a leitura da deflexão θ , e também da marcha para controle das velocidades em rpm

Para medida da densidade do fluido de perfuração foi utilizada a balança de lama Fann modelo 140 (Figura 4. 5). A metodologia de ensaio é simples, coloca-se o fluido ensaiado no recipiente (copinho) da balança. A medida de densidade é obtida através do ajuste de uma peça móvel. Esta peça é deslocada, a fim de equilibrar a balança, tendo como referência um nível de bolha. A medida de densidade é então obtida na marcação presente no braço da balança onde a peça móvel equilibrou o conjunto.



Figura 4. 5 - Balança de lama Fann modelo 140

Para a análise dos ensaios foi utilizado o programa SIMCARR[®] 6, desenvolvido no GTEP. O SIMCARR[®] 6 foi desenvolvido utilizando os ambientes de desenvolvimento integrado Borland C++ 6.02. A Figura 4. 6 apresenta a janela principal do SIMCARR[®] 6, logo abaixo das opções iniciais há uma barra de ferramentas que facilita a utilização dos comandos. Ao passar o mouse em qualquer um dos botões da barra de ferramentas, ou item de menu, uma descrição da função do botão será mostrada.

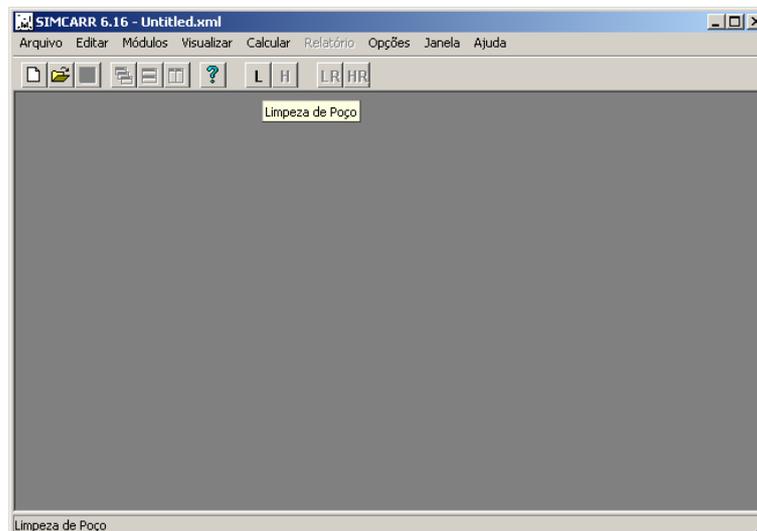


Figura 4. 6 - Janela principal do SIMCARR[®] 6

Este programa foi desenvolvido para avaliação da limpeza de poço, avaliação de pressões de poço e perda de carga no sistema. Adicionalmente, ele também permite calcular os parâmetros reológicos relativos ao fluido de

perfuração, para um determinado modelo escolhido. Caso o modelo escolhido seja *não Newtoniano*, deve-se escolher, ainda, o modelo reológico para este fluido, informar a densidade do fluido, que pode ser obtida na balança de lama Fann modelo 140, as leituras de deflexão θ obtidas nos ensaios com o viscosímetro Fann 35A, e ainda, o tipo de fluido. Para o fluido *Newtoniano* o usuário deve informar somente a densidade e a viscosidade do fluido (Figura 4. 7 e Figura 4. 8).

Leitura	Deflexão
600	76.0
300	50.0
200	40.0
100	29.0
6	17.0
3	16.0

Figura 4. 7 - Janela do programa SIMCARR[®] 6 para fluido *não Newtoniano*

Leitura	Deflexão
600	50.0
300	38.0
200	29.0
100	20.0
6	8.0
3	7.0

Figura 4. 8 - Janela do programa SIMCARR[®] 6 para fluido *Newtoniano*

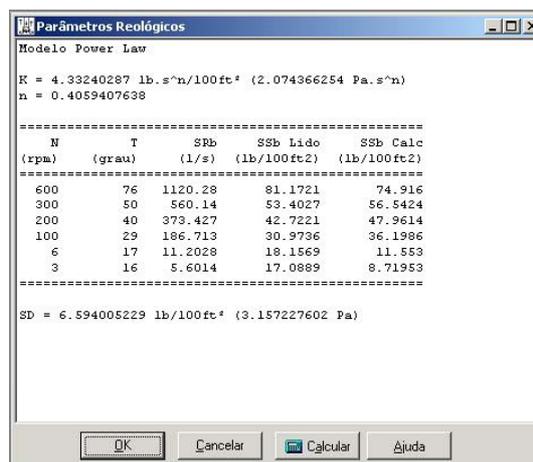
Após ter preenchido todos os campos necessários, e escolhido o modelo reológico desejado, pressionando o ícone CALCULAR, os cálculos são executados pelo programa gerando uma janela com os parâmetros reológicos calculados (Figura 4. 9). A sigla SD na parte inferior da janela significa o desvio padrão, que indica o quão o fluido ensaiado se encaixa no modelo sugerido. Quanto maior o valor de SD menos adaptado para aquele modelo o fluido estará. Então o procedimento é testar o fluido em questão, utilizando todos os modelos

disponíveis no SIMCARR[®] 6 e posteriormente escolher o modelo que mais se adapta àquele fluido, ou seja, o modelo cujo desvio padrão apresentou menor valor.

Obtido o modelo reológico que melhor se adapta, o programa fornece valores de tensão cisalhante (τ) em lb/100ft² para cada valor de velocidade em rpm (N), e fornece também a taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) em s⁻¹. Isto possibilita ao usuário a construção dos gráficos de curva de fluxo e de viscosidade. O valor da viscosidade (μ) em cP é calculado segundo a Equação 4.6:

$$\mu = 300. \tau/N \quad (4.6)$$

Os gráficos podem ser construídos no programa Excel, através de regressão linear, utilizando o modelo de potência, ferramenta presente neste programa. A curva de viscosidade apresenta-se em coordenadas logarítmicas.



Parâmetros Reológicos

Modelo Power Law

K = 4.33240287 lb.sⁿ/100ft² (2.074366254 Pa.sⁿ)
n = 0.4059407638

N (rpm)	T (grau)	SRb (1/s)	SSb Lido (lb/100ft ²)	SSb Calc (lb/100ft ²)
600	76	1120.28	81.1721	74.916
300	50	560.14	53.4027	56.5424
200	40	373.427	42.7221	47.9614
100	29	186.713	30.9736	36.1986
6	17	11.2028	18.1569	11.553
3	16	5.6014	17.0889	8.71953

SD = 6.594005229 lb/100ft² (3.157227602 Pa)

OK Cancelar Calcular Ajuda

Figura 4. 9 - Janela de cálculo dos parâmetros reológicos

4.5. Ensaio Realizados e Análise dos Resultados

Seguindo a metodologia proposta foram realizados os ensaios de reologia com os fluidos produzidos e utilizados nos ensaios de difusão. O primeiro fluido, denominado fluido real, é composto de Goma Xantana, HPA e um Bactericida dissolvidos em água pura. No segundo fluido, denominado fluido real salino, utilizou-se os mesmos componentes, mas desta vez dissolvidos numa solução 40% em peso de Formiato de Sódio (NaCOOH).

A Tabela 4. 1 refere-se às medidas de deflexão obtidas no “dial” feitas no viscosímetro Fann 35A para o fluido real e para o fluido real salino. As medidas de densidade para o fluido real e para o fluido real salino obtidas por meio da balança de lama foram de $1,01 \text{ g/cm}^3$ e $1,18 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Tabela 4. 1 - Medidas de deflexão realizada no viscosímetro Fann 35A, para os fluidos ensaiados

	Fluido Real	Fluido Real Salino
θ_{600}	117	210
θ_{300}	94	147
θ_{200}	82	120
θ_{100}	68	90
θ_6	38	40
θ_3	34	33

A partir destes resultados de deflexão que foram utilizados no programa SIMCARR[®] 6, os valores de (τ) e (γ) retornados pelo programa e a viscosidade (μ) calculada pela Eq. 4.6, pode-se construir os reogramas de tensão cisalhante ou viscosidade versus taxa de cisalhamento, os quais permitem inferir sobre o comportamento do fluido. As análises realizadas mostraram que o modelo reológico de Herschell-Buckley é o que fornece o menor desvio padrão. A Figura 4. 10 e a Figura 4. 11 apresentam os gráficos da curva de fluxo e de viscosidade obtidos para o fluido real.

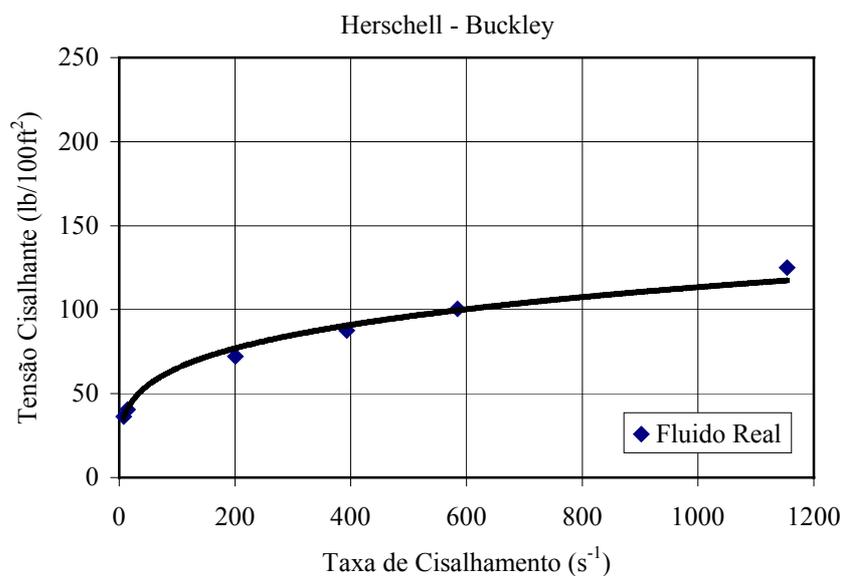


Figura 4. 10 - Curva de fluxo para o fluido real

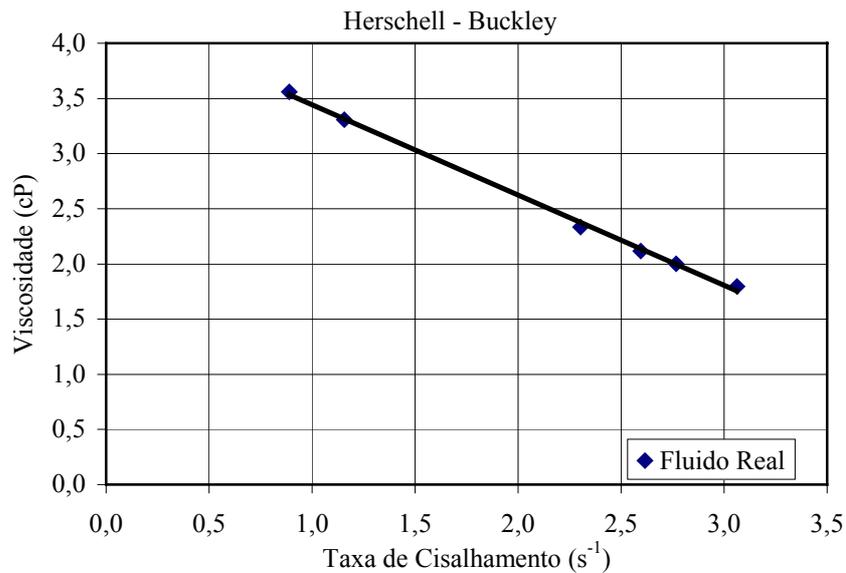


Figura 4. 11 - Curva de viscosidade do fluido real

A Figura 4. 12 e a Figura 4. 13 mostram o resultado da curva de fluxo e de viscosidade para o fluido real goma xantana, HPA e bactericida com a adição de formiato de sódio (NaCOOH) 40% em peso.

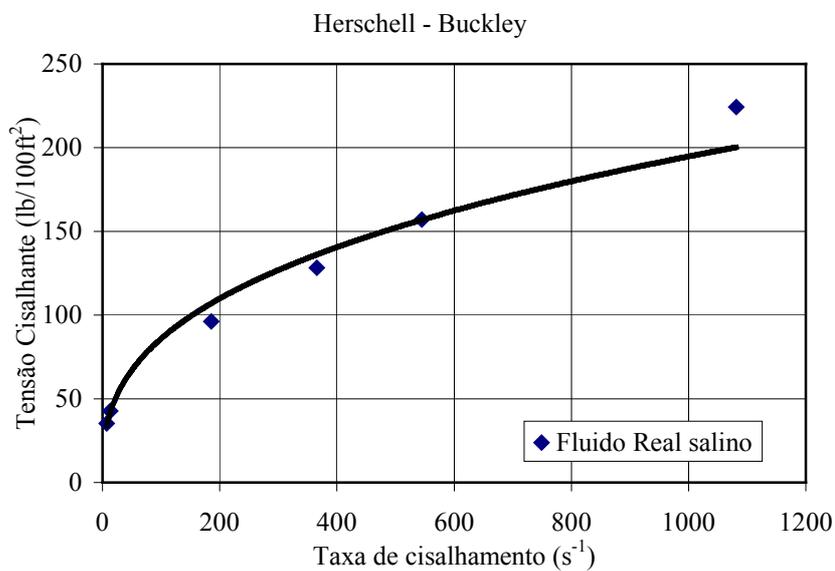


Figura 4. 12 - Curva de fluxo do fluido real salino

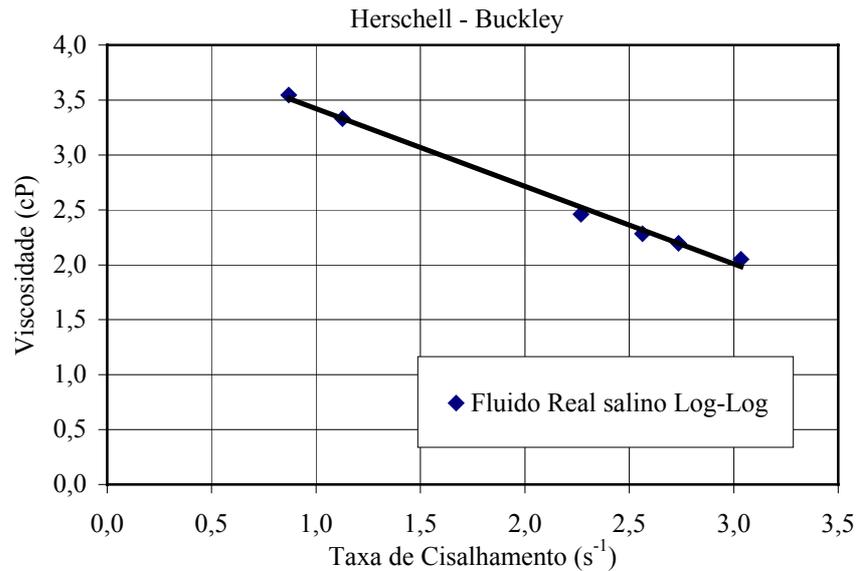


Figura 4. 13 - Curva de viscosidade do fluido real salino

De posse das leituras de deflexão θ obtidas no viscosímetro (Tabela 4. 1) utilizou-se o software SIMCARR[®] 6, como já foi descrito anteriormente, para escolher o modelo reológico mais adequado aos fluidos estudados e obter os parâmetros deste modelo. A Tabela 4. 2 apresenta os valores dos parâmetros obtidos para este modelo.

Tabela 4. 2 - Parâmetros reológicos do fluido real e do fluido real salino

Fluido	Parâmetros Reológicos			
	τ_0 (lb/100ft ²)	n_c	K_c (lbs ⁿ /100ft ²)	SD (lb/100ft ²)
<i>Goma Xantana, HPA e Bactericida</i>	24,94	0,43	4,86	0,44
<i>Goma Xantana, HPA, Bactericida + NaCOOH</i>	27,28	0,60	2,88	1,29

Onde;

τ_0 (lb/100ft²) = limite de escoamento real;

n_c = índice de comportamento;

K_c (lbsⁿ/100ft²) = índice de consistência;

SD (lb/100ft²) = desvio padrão.

Conforme os gráficos acima, e tomando como base a literatura, estes dois fluidos reais estudados, que são exemplos típicos de componentes utilizados corriqueiramente nos fluidos de perfuração da indústria do petróleo, se comportam como fluidos *não Newtonianos* pseudoplásticos, isto é, $0 < n_c < 1$ (Tabela 4. 2). Os gráficos mostram um decréscimo acentuado de viscosidade quando a taxa de

cisalhamento é aumentada, exibindo pseudoplasticidade. Pode-se notar também que ocorre um aumento da tensão cisalhante no fluido real salino (225 lb/100ft²) em comparação ao fluido real (125 lb/100ft²). A adição do sal no fluido não afeta a viscosidade de ambos, para o fluido real (3,5 - 1,8 cP) e para o fluido real salino (3,5 - 2,0 cP). A taxa de cisalhamento para o fluido real foi de (1153 s⁻¹) e para o fluido salino (1081 s⁻¹), notando-se uma redução com a adição de sal. Na Tabela 4. 2 observa-se que os valores de τ_0 obtidos foram similares, já os valores de índice de consistência K_c foram bem diferentes, caindo quase pela metade no fluido salino. Para o índice de comportamento n_c , nota-se uma maior aproximação do fluido salino do comportamento *Newtoniano*.

Na indústria do petróleo o fluido pseudoplástico é muito utilizado, um dos motivos pode estar relacionado ao fato de sua viscosidade diminuir com o aumento da taxa de cisalhamento, conforme se observa nas Equações 4.7 e 4.8:

$$\gamma = \Delta v / \Delta y \quad (4.7)$$

$$\mu_a = \tau / \gamma \quad (4.8)$$

Onde;

Δv = diferença de velocidade entre duas camadas de fluido adjacentes;

Δy = distância entre estas duas camadas;

μ_a = viscosidade aparente.

Nota-se pela Equação 4.7, que com o aumento da velocidade de escoamento do fluido dentro da coluna de perfuração, tem-se um aumento da taxa de cisalhamento, e conseqüentemente uma diminuição da viscosidade deste fluido, pois dentro da coluna necessita-se de uma certa facilidade do fluido escoar. Quando o fluido de perfuração atinge a formação, na região situada na ponta da broca, ocorre uma redução brusca de velocidade e, portanto, da taxa de cisalhamento, levando a um aumento da viscosidade do fluido, que por sua vez atende a exigência de transportar os cascalhos até a superfície, liberados pela broca durante a perfuração.

4.6. Conclusões

Foi mostrado neste Capítulo um pequeno estudo da reologia do fluido de perfuração utilizado, marcando o princípio das pesquisas por parte do Laboratório de Interação Rocha-Fluido/GTEP da PUC-Rio neste segmento da engenharia de petróleo. Observou-se nos ensaios que ambos os fluidos são *não Newtonianos* pseudoplásticos, resultado já esperado, devido aos elementos presentes no fluido. Os equipamentos utilizados foram de fundamental importância para a realização dos ensaios. Isto porque, para a obtenção de resultados confiáveis de caracterização reológica é de suma importância a utilização de equipamentos confiáveis e calibrados, além de métodos e procedimentos certificados.

A importância de se apresentar este Capítulo reside na ênfase dada pela indústria aos conhecimentos básicos de reologia que irão auxiliar na análise do comportamento dos fluidos desenvolvidos e usados nas etapas de perfuração e produção de poços. O conhecimento destes parâmetros, dentre outras aplicações, auxilia na estimativa de perdas de carga e na capacidade de transporte e sustentação de sólidos, como os cascalhos.