

Desenvolvimento de fluidos aquosos para aplicação em perfuração de poços de petróleo – Parte I

K. V. Farias^{1*}; L. V. Amorim²; H. L. Lira³

¹Doutorado em Engenharia de Processos, Bolsista PRH-25/ANP/CCT – UFCG

²Pesquisadora Visitante, PRH-25/ANP/CCT – UFCG

³Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UAEMA/CCT - UFCG

Rua Aprígio Veloso, 882, CEP 58429-900, Campina Grande - PB

(Recebido em 24/11/2008; revisado em 10/02/2009; aceito em 25/03/2009)

(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

Resumo:

Este trabalho tem como objetivo desenvolver formulações de fluidos aquosos contendo aditivos anti-espumante, viscosificante, redutor de filtrado, controlador de pH, inibidores de argilas expansivas, bactericida, lubrificante e selante, para aplicação em perfuração de poços de petróleo e avaliar seu comportamento reológico, de filtração e de lubricidade. Foram estudadas vinte formulações de fluidos, sendo o seu desempenho avaliado por meio do comportamento reológico (curvas de fluxo, viscosidades aparente e plástica, limite de escoamento e força gel), de filtração API (volume de filtrado e espessura do reboco) e de lubricidade (coeficiente de lubricidade). Os resultados foram comparados aos obtidos com um fluido utilizado por uma empresa multinacional definido como fluido Padrão. Os resultados mostraram que dentre as formulações desenvolvidas, oito apresentaram desempenho próximo ao fluido Padrão.

Palavras-chave: Fluidos aquosos; aditivos; propriedades reológicas.

Abstract:

The aim of this work is to develop formulations of water-based drilling fluids with additives viscosifying, filtrate reducer, pH controller, clay-hydration inhibitor, antifoam, bactericide, lubricant and sealant; for use in oil well perforation and to evaluate rheological behavior. Twenty fluid formulations had been studied and their performance was evaluated by means of the rheological behavior (flow curves, apparent and plastic viscosities, yield limit and gel force), API filtration (filtrate volume and filter-cake thickness) and lubricity (lubricity coefficient). The results were compared with a fluid used by a multinational company (standard fluid). The results showed that from the formularizations developed eight presented performance close to the standard fluid.

Keywords: Water-based drilling fluids; additives; rheological properties.

* E-mail: kassievieira@hotmail.com (K. V. Farias)

1. Introdução

Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos e, por vezes, até gases, que, do ponto de vista químico, podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes [1].

Suas principais funções são: carrear os fragmentos das rochas perfuradas até a superfície; manter os cascalhos em suspensão durante as paradas de circulação do fluido no poço; resfriar e lubrificar a broca; estabilizar as pressões nas paredes do poço e conter os fluidos (óleo, gás ou água) na camada geológica portadora, conhecida como rocha reservatório [2].

Os fluidos são tradicionalmente classificados de acordo com o seu constituinte principal da fase contínua (ou dispersante), em: fluidos à base de água, fluidos à base de óleo, fluidos sintéticos e fluidos à base de ar. Os fluidos à base de gás são constituídos de um fluxo de ar ou gás natural injetado no poço a alta velocidade. Os fluidos à base de água são aqueles cuja fase líquida contínua é constituída por água, enquanto que nos fluidos à base de óleo, a fase contínua é constituída por óleo [3,4]. Os fluidos sintéticos são fluidos cuja fase contínua é constituída por líquido sintético.

Atualmente, um aumento no número dos cenários de perfuração envolve reservatórios mais profundos, poços de geometria complexa, onde são mais freqüentes altas temperatura e pressão, e um aumento de exigências dos órgãos ambientais, requerendo um fluido de perfuração mais elaborado, ou seja, contendo uma variedade de aditivos [5].

A seleção e a utilização de um fluido de perfuração adequado tem sido um importante papel técnico e econômico na perfuração de um poço. Vários aditivos, como lubrificante, anti-espumante, viscosificante, redutor de filtrado, inibidor de argilas hidratáveis ou expansivas, controlador de pH, selante e bactericida, são utilizados na composição do fluido. Cada aditivo tem uma função específica, sendo o custo do fluido de perfuração diretamente proporcional à quantidade e tipos de aditivos utilizados. Ainda que responsável por uma significativa porcentagem dos custos da perfuração de poços, um fluido de perfuração adequado, mesmo que seja de custo elevado, pode significar grande economia se evitar alguns dos problemas de instabilidade, normalmente encontrados [6].

A inibição de argila hidratáveis ou folhelho (rocha selante muito comum de ser encontrada em campos de exploração) é mais difícil de se alcançar com os sistemas base água devido à similaridade

das características de molhabilidade entre o fluido de perfuração e a formação. Sendo assim, o método utilizado para se manter o poço estável é a utilização de fluidos especiais de perfuração [7]. Neste contexto, os fluidos base óleo apresentam como principal vantagem a redução do fluxo de água e íons para a formação, devido a sua grande pressão capilar na interface fluido-folhelho. Estes fluidos também apresentam elevado grau de inibição em relação às rochas ativas (formações sujeitas a interações físico-químicas), baixíssima taxa de corrosão e grau de lubrificidade elevado. Devido a estas características, os fluidos base óleo têm conferido excelentes resultados na perfuração de poços. Porém, nos últimos anos, devido ao seu alto potencial de poluição, o uso destes fluidos em alguns países tem sido condenado.

Nos dias atuais, os fluidos de perfuração têm sido alvo de diversas discussões entre pesquisadores, grupos de pesquisa, empresas da área e órgãos ambientais. O principal ponto de discussão é encontrar soluções aos problemas causados pela contaminação das formações geológicas com as quais o fluido de perfuração entra em contato, podendo-se destacar os reservatórios de hidrocarbonetos e os aquíferos.

Desta forma, a indústria do petróleo começou a demonstrar um grande interesse no desenvolvimento de um fluido de perfuração ambientalmente seguro que de uma maneira eficaz promova a estabilização da formação, como promovem os fluidos base óleo e os fluidos sintéticos. Estas pesquisas visam o desenvolvimento de fluidos de perfuração base água, ou seja, fluidos contendo diversos componentes químicos dissolvidos numa fase contínua, no caso a água [6].

O uso de fluidos base água em formações ativas como folhelhos, normalmente acarretam em problemas de instabilidade de poços. As incidências destes problemas aumentam com as novas técnicas de perfuração de poços inclinados e se manifestam em grande parte através de perda de circulação, aprisionamento da coluna, instabilidade da parede do poço, provocando um alargamento deste e o dano da formação com redução no desempenho do reservatório [6]. A solução desses problemas implica em tempo ocioso na perfuração e o conseqüente aumento de custos para a indústria do petróleo.

Muitos estudos com fluidos de perfuração base água vêm sendo realizados, como o desenvolvimento de fluidos de perfuração com alta capacidade de inibição e alta lubrificidade. Todos os fluidos desenvolvidos foram envelhecidos em forno

rotativo por 16 horas à 180°F. As formulações foram avaliadas quanto aos parâmetros reológicos à 135°F. Foram determinadas as medidas de volume de filtrado e de coeficiente de lubrificidade. Os resultados indicaram que a combinação adequada de produtos, já disponíveis no mercado, pode levar à obtenção de fluidos de desempenho igual ou superior aos fluidos de alto desempenho utilizados pelas companhias multinacionais [8].

Com isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver formulações de fluidos aquosos contendo aditivos anti-espumante, viscosificante, redutor de filtrado, controlador de pH, inibidores de argilas expansivas, bactericida, lubrificante e selante, para aplicação na perfuração de poços de petróleo e avaliar seu comportamento reológico, de filtração e de lubrificidade.

2. Materiais e métodos

2.1.1. Aditivos

Para a preparação dos fluidos de perfuração foram estudados os seguintes aditivos: viscosificante, inibidores de argila expansiva, anti-espumante, bactericida, lubrificante, redutor de filtrado, controlador de pH e selante.

2.2. Métodos

2.2.1. Formulações

Foram desenvolvidas 20 formulações de fluidos de perfuração base água, de acordo com as concentrações dos aditivos apresentadas na Tabela 1. Os aditivos estudados foram fornecidos por uma Empresa nacional.

Foi também estudado um fluido, denominado de Padrão, cujos aditivos e formulação foram fornecidos pela PETROBRAS, como elemento comparativo.

2.2.2. Preparação de fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração foram preparados de acordo com a prática de campo, que consiste em adicionar os aditivos, um a um, sob agitação constante a uma velocidade de 13.000 rpm em agitador Hamilton Beach, modelo 936. Os fluidos foram preparados em um volume de 350 mL de água industrial, e os aditivos foram adicionados um a um obedecendo a ordem apresentada na Tabela 1. Após adição dos aditivos, a velocidade do agitador foi aumentada para 17.000 rpm, permanecendo por 10 min. A seguir, o fluido permaneceu em repouso durante 24 h.

Tabela 1: Aditivos e concentrações utilizados nas formulações dos fluidos de perfuração.

ADITIVOS	Unidades	Concentrações
Anti-espumante	gotas	0 a 15,0
Viscosificante	g/350 mL*	0,75 a 2,5
Redutor de filtrado	g/ 350 mL*	2,0 a 5,0
Controlador de pH	g/ 350 mL*	1,0
Inibidor I	g/ 350mL*	0 a 21,0
Inibidor II	g/ 350mL*	0 a 12,0
Inibidor III	g/ 350mL*	0 a 12,0
Bactericida	g/ 350mL*	0,7
Lubrificante	%	1,0 a 2,0
Selante	g/ 350mL*	15,0 a 30,0

* lb/bbl x 0,00285301 = 1 g/mL.

2.2.3. Estudo reológico e determinação do volume de filtrado

Para o estudo reológico, o fluido, após 24 h de repouso, foi agitado durante 5 min em agitador mecânico Hamilton Beach modelo 936 na velocidade de 17.000 rpm. Em seguida, o fluido foi transferido para o recipiente do viscosímetro Fann modelo 35 A com combinação R1 B1 e mola de torção F1, sendo R1 o raio do cilindro externo e B1 o raio do cilindro interno do viscosímetro com valores de 1,8415 cm e 1,7245 cm respectivamente. F1 é a constante da mola com valor igual a 1 [9]. Neste equipamento, seis valores de torque foram lidos com taxas de cisalhamento variando de 5,1 s⁻¹ a 1022 s⁻¹. O equipamento foi acionado na velocidade de 600 rpm durante 2 min e efetuada a leitura. Logo após, a velocidade foi mudada para 300 rpm e efetuada a leitura após 15 seg. Em seguida, mudou-se a velocidade para 200 rpm e esperou-se estabilizar para efetuar a leitura. O mesmo procedimento foi utilizado para as velocidades de 100 rpm, 6 rpm e 3 rpm. Com os dados de leitura e após tratamento matemático, foram traçadas as curvas de fluxo (tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento) dos fluidos estudados.

Para obtenção da força gel inicial, o fluido durante 15 s foi mantido no viscosímetro Fann 35A na velocidade de 600 rpm e, em seguida, permaneceu em repouso durante 10 s. Logo após, colocou-se na velocidade de 3 rpm, efetuando-se a leitura. A seguir, para a obtenção da força gel final, o fluido foi deixado em repouso durante 10 min e, logo após, efetuada a leitura na velocidade de 3 rpm. A força gel é a diferença entre o gel final e o gel inicial.

As viscosidades aparente (VA) e plástica (VP), o limite de escoamento (LE) e o volume do filtrado (VF) foram obtidos segundo a norma N-2605 [10]. A VA é o valor obtido na leitura a 600 rpm dividido por 2, dada em cP, e a viscosidade plástica (VP) é a diferença das leituras obtidas a 600 rpm e a 300

rpm, dada também em cP. O LE é a diferença entre a leitura a 300 rpm e a VP, dado em N/m².

O volume do filtrado (VF) foi determinado em filtro prensa da marca Fann, com aplicação de uma pressão da ordem de 7,0 kgf/cm² (100 psi) durante 30 min. Os resultados são expressos em mL.

2.2.4. Determinação da espessura do reboco

Para a determinação da espessura do reboco foi seguida a metodologia desenvolvida por Farias (2005) [11], que consiste nas etapas apresentadas a seguir.

Inicialmente, é coletado o papel de filtro com o reboco após a realização do ensaio para a determinação do volume de filtrado. Em seguida, esse papel de filtro é lavado três vezes a uma vazão de aproximadamente 110 L/h com o auxílio de um recipiente de nível constante com vazão regulável, a uma distância de aproximadamente 7,0 cm do controlador de vazão com diâmetro de 15,0 mm e com ângulo de ataque do fluxo da água de aproximadamente 45°. Após a lavagem para a retirada do excesso do fluido na superfície do reboco, o papel de filtro é colocado entre duas lâminas de vidro confeccionadas com o mesmo diâmetro do papel de filtro. A seguir, o papel de filtro com o reboco entre as lâminas de vidro é submetido a uma pressão de aproximadamente 277,6 N/m² por um período de 2 min com a finalidade de uniformizar a superfície do reboco. Após esse período é medida a espessura do reboco com o auxílio de um extensômetro. São feitas cinco medidas das espessuras das lâminas de vidro e do papel de filtro com o reboco em pontos distintos. Após obtenção das medidas, é feita uma média aritmética das cinco determinações e descontada a espessura das duas placas de vidro e do papel molhado, sendo determinada a espessura do reboco (ER) em milímetros com aproximação em centésimos.

2.2.5. Determinação do coeficiente de lubrificidade

Para a determinação do coeficiente de lubrificidade foi utilizado um lubrificímetro da marca Ofite. Utilizou-se a metodologia sugerida pelo fabricante que consiste em agitar o fluido durante 5 min a alta rotação e, logo após, transferir para o recipiente do lubrificímetro, no qual permanece por 5 min a uma rotação de 60 rpm e torque 0. Em seguida, é aplicada uma força de 150 in/lb (equivalente a aplicar uma pressão de 34.500 a 69000 kPa) e efetuada a leitura após 5 min. Logo

após, calcula-se o coeficiente de lubrificidade (CL) a partir dos seguintes tratamentos matemáticos.

$$FC = 34 / \text{Leitura}_{\text{água}} \quad (1)$$

$$CL = (\text{Leitura}_{\text{fluido}} \times FC) / 100 \quad (2)$$

sendo:

FC = fator de correção;

Leitura_{água} = Leitura do lubrificímetro obtida com água deionizada;

Leitura_{fluido} = Leitura do lubrificímetro obtida com o fluido de teste;

CL = coeficiente de lubrificidade (adimensional).

3. Resultados

3.1. Estudo do comportamento reológico: curvas de fluxo

As curvas de fluxo dos fluidos preparados a partir das formulações estudadas (Tabela 1) estão apresentadas na Figura 1.

Observou-se que as curvas de fluxo de todos os fluidos apresentaram comportamento pseudoplástico ou fluido de potência. Este tipo de comportamento pode ser causado por diversos fatores, dentre os quais as características físicas das partículas, como sua área superficial, formato e dimensões; o tipo de interação entre as partículas (atração ou repulsão), e a concentração, peso molecular e conformação de moléculas de dispersantes presentes no meio líquido. A presença de aglomerados relativamente fracos na suspensão, originados pela atuação de forças de interação atrativas entre partículas, pode ser considerada a principal causa do fenômeno de pseudoplasticidade [12].

A variação das concentrações estudadas dos aditivos, bem como a variação do tipo de inibidor de argilas expansivas nas formulações dos fluidos de perfuração não apresentaram influências no seu comportamento reológico.

As equações das curvas, os coeficientes de determinação (R²), os índices de comportamento de fluxo (n) e os índices de consistência do fluido (K) dos fluidos desenvolvidos estão apresentados na Tabela 2.

O coeficiente de determinação (R²) de todos os fluidos foi em média de 0,99; valor muito próximo de 1, o que representa uma ótima correlação dos dados experimentais com o modelo matemático proposto.

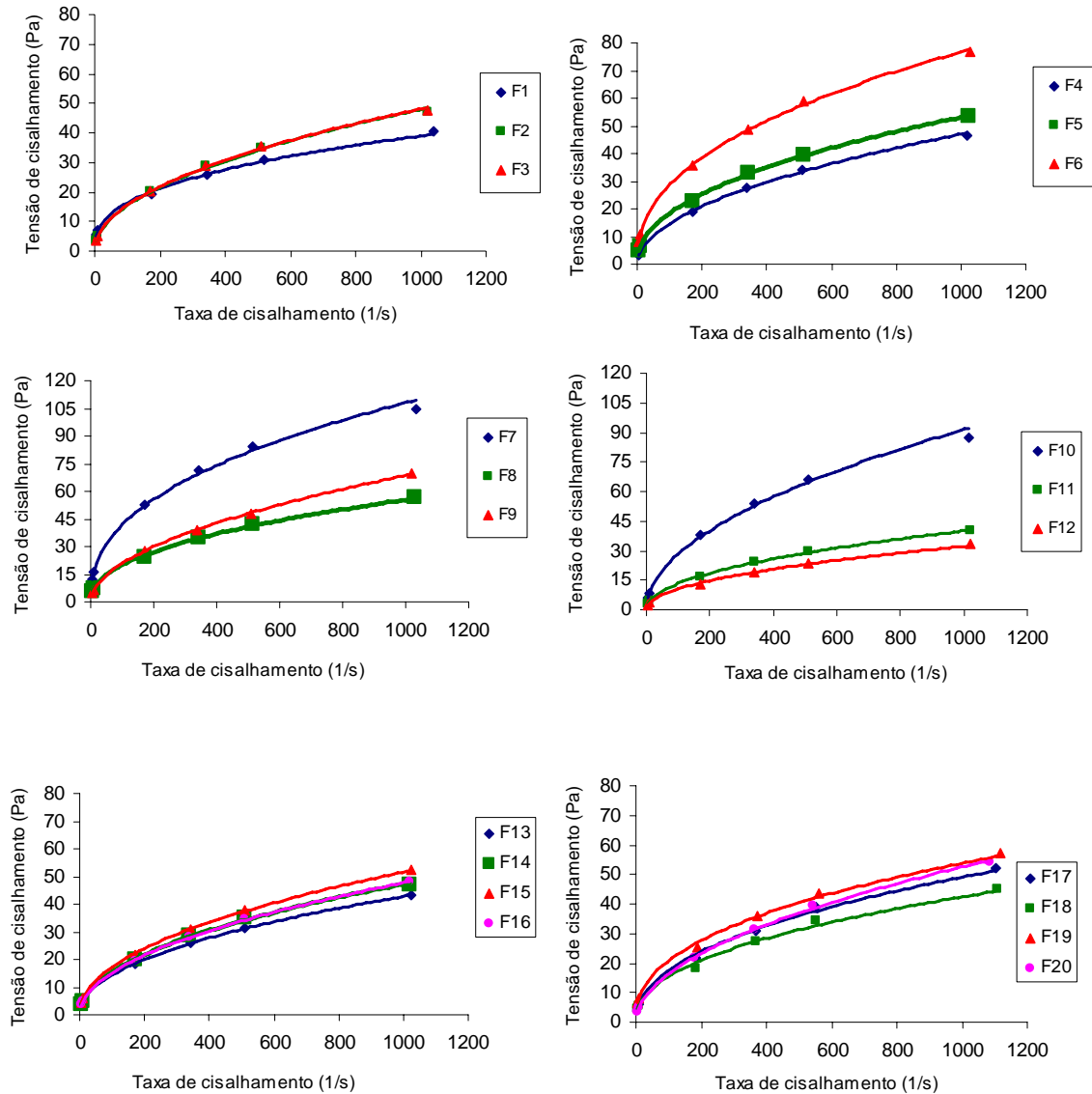


Figura 1: Curvas de fluxo dos fluidos: (a) F1, F2 e F3; (b) F4, F5 e F6; (c) F7, F8 e F9; (d) F10, F11 e F12; (e) F13, F14, F15 e F16; (f) F17, F18, F19 e F20.

O índice do comportamento de fluxo (n) foi em torno de 0,5. Esse índice indica o quanto o comportamento de fluxo do fluido se afasta do comportamento Newtoniano; fluidos com valores próximos da unidade apresentam comportamento próximo de um fluido Newtoniano.

O índice de consistência do fluido (K) variou de 1,3115 para o fluido F2 a 5,2601 para o fluido F10. Esse índice, por sua vez, indica o grau de resistência do fluido ao escoamento; quanto maior o valor de K , maior a sua resistência ao escoamento e, portanto, maior a sua viscosidade.

3.2. Propriedades reológicas, de filtração e de lubrificação

3.2.1. Influência do anti-espumante

Na Tabela 3 estão apresentadas as formulações dos fluidos F1, F2, F3 e F4, nas quais foi variada a concentração do anti-espumante com o objetivo de se estudar a influência deste aditivo nessas formulações.

Durante o preparo dos fluidos, foi observado que os aditivos viscosificante e o redutor de filtrado promovem uma maior quantidade de espuma, sendo assim, é adequado que o anti-espumante seja acrescentado na água de preparo, antes dos aditivos.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 4, observou-se que os valores de viscosidade aparente (VA) apresentaram pouca variação com o aumento da concentração do anti-espumante, variando de

40,8 cP para o fluido F1 (sem anti-espumante) a 46,6 cP para o fluido F3 (com 10 gotas de anti-espumante). Os valores de viscosidade plástica (VP), de força gel (FG), de limite de escoamento (LE), de volume de filtrado (VF) e de espessura do reboco (ER) não apresentaram variações

significativas com o aumento da concentração do anti-espumante. Os valores de coeficiente de lubrificidade (CL) apresentaram pequenas variações, variando de 0,084 para o fluido F1 a 0,112 para o fluido F4.

Tabela 2. Equação da curva, coeficiente de determinação (R^2), índice de comportamento de fluxo (n) e índice de consistência do fluido (K) dos fluidos estudados.

FLUIDO	EQUAÇÃO	R ²	K	N
F1	$y = 1,5033x^{0,4918}$	0,9998	1,5033	0,4918
F2	$y = 1,3115x^{0,5014}$	0,9996	1,3115	0,5014
F3	$y = 1,5849x^{0,4936}$	0,9997	1,5849	0,4936
F4	$y = 1,5035x^{0,4748}$	0,9998	1,5035	0,4918
F5	$y = 2,2498x^{0,4577}$	0,9995	2,2498	0,4577
F6	$y = 4,0156x^{0,4269}$	0,9998	4,0156	0,4269
F7	$y = 1,4740x^{0,4937}$	0,9998	1,4740	0,4937
F8	$y = 2,6392x^{0,4404}$	0,9998	2,6392	0,4404
F9	$y = 1,9579x^{0,5148}$	0,9999	1,9579	0,5148
F10	$y = 5,2601x^{0,4123}$	0,9994	5,2601	0,4123
F11	$y = 1,4774x^{0,4776}$	0,9995	1,4774	0,4776
F12	$y = 1,1395x^{0,4833}$	0,9999	1,1395	0,4833
F13	$y = 1,7648x^{0,4893}$	0,9999	1,7648	0,4893
F14	$y = 1,7155x^{0,4800}$	0,9997	1,7155	0,4800
F15	$y = 1,9414x^{0,4747}$	0,9998	1,9414	0,4747
F16	$y = 1,5729x^{0,4940}$	0,9986	1,5729	0,4940
F17	$y = 1,6447x^{0,4957}$	0,9999	1,6447	0,4957
F18	$y = 1,4191x^{0,4952}$	0,9999	1,4191	0,4952
F19	$y = 1,8947x^{0,4895}$	0,9999	1,8947	0,4895
F20	$y = 1,5534x^{0,4979}$	0,9995	1,5534	0,4979

Tabela 3: Formulações dos fluidos com variação na concentração do anti-espumante.

Componentes	F1	F2	F3	F4
Água (mL)	350	350	350	350
Anti-espumante (gotas)	-	6	10	15
Viscosificante (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Inibidor I (g)	21,0	21,0	21,0	21,0
Inibidor II (g)	12,0	12,0	12,0	12,0
Inibidor III (g)	-	-	-	-
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0

Em resumo, observou-se que o aumento da concentração do anti-espumante, de 6 para até 15 gotas, não influenciou nos valores das propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade dos fluidos estudados e a menor concentração (6 gotas) utilizada nas formulações é suficiente para

promover uma menor formação de espuma. Desta forma, foi selecionada esta concentração para utilização nas demais formulações visando atender o objetivo deste trabalho.

É importante ressaltar que a espuma em grande quantidade pode mascarar os resultados,

promovendo altos valores de viscosidades, como observado em estudos com fluidos hidroargilosos realizados por Farias [11].

O anti-espumante é um aditivo à base de silicone. O seu efeito é desestabilizar filmes formados por agentes tensoativos presentes no fluido, ou seja, as bolhas de espuma. O anti-espumante entra nesses filmes e desestabiliza suas estruturas, causando o rompimento do filme e, conseqüentemente, a não formação das espumas. A partir de sua estrutura apolar atípica, o anti-espumante não consegue penetrar na estrutura do filme formado nas bolhas e acaba por torcer toda a estrutura e rompê-la. De acordo com a formulação e com os aditivos presentes, ele pode agir até um certo limite e depois adquirir uma configuração

estável, o que o torna inerte quimicamente para esse fim, como foi observado para concentrações acima de 6 gotas.

Comparando os resultados dos fluidos estudados com os obtidos a partir do fluido Padrão apresentado na Tabela 4, observou-se que os valores de VA, VP, FG, LE e CL dos fluidos F2, F3 e F4 encontram-se no intervalo de valores do fluido de referência, sendo o fluido F2 o que apresenta a menor concentração de anti-espumante (6 gotas). Os valores dessas propriedades obtidos para os demais fluidos (F1, F3 e F4) e os valores de VF e ER estão superiores aos valores apresentados pelo fluido Padrão.

Tabela 4: Propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade dos fluidos com variação da concentração do anti-espumante.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	FG (cP)	LE (N/m ²)	VF (mL)	ER (mm)	CL
F1	40,8	22,0	2,0	37,5	7,6	0,665	0,084
F2	46,2	23,6	3,2	45,0	7,8	0,631	0,103
F3	46,6	24,1	3,0	45,0	7,9	0,645	0,101
F4	45,5	24,0	2,5	43,0	7,6	0,604	0,112
Padrão	44,5-60,0	23,5-35,0	2,0-3,5	39,0-48,0	6,0-7,2	0,400-0,550	0,090-0,120

Sendo: VA - viscosidade aparente; VP - viscosidade plástica; FG - força gel; LE- limite de escoamento; VF - volume de filtrado; ER - espessura do reboco e CL - coeficiente de lubrificidade.

3.2.2. Influência do Viscosificante e do Redutor de Filtrado

Na Tabela 5 estão apresentadas as formulações dos fluidos estudadas, nas quais foram variadas as

concentrações do viscosificante e do redutor de filtrado, com o objetivo de se estudar as melhores concentrações destes aditivos e suas influências nessas formulações.

Tabela 5: Formulações dos fluidos com variação nas concentrações do viscosificante e do redutor de filtrado.

Componentes	F2	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12
Água (mL)	350	350	350	350	350	350	350	350	350
Anti-espumante (gotas)	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Viscosificante (g)	1,0	1,5	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,0	0,75
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,5	4,0	4,5	3,0	4,0	5,0	2,5	2,0
Controlador de pH (g)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Inibidor I (g)	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0	21,0
Inibidor II (g)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Inibidor III (g)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0

As propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade obtidas com os fluidos estudados estão apresentadas na Tabela 6. Observaram-se significativas variações nos valores das propriedades reológicas dos fluidos. Os valores de VA variaram de 32,4 cP para o fluido F12 a 102,5 cP para o fluido F7, que apresentam em suas formulações as menores e as maiores concentrações

de viscosificante e redutor de filtrado, respectivamente. Os valores de VP, de FG e de LE também apresentaram o mesmo comportamento observado para a VA, ou seja, apresentaram um aumento nessas propriedades com o aumento da concentração do viscosificante e do redutor de filtrado.

Esse comportamento é decorrente da ação do viscosificante, que é um aditivo que tem como

principal função conferir viscosidade ao fluido.

Tabela 6: Propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade dos fluidos com variação nas concentrações do viscosificante e do redutor de filtrado.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	FG (cP)	LE (N/m ²)	VF (mL)	ER (mm)	CL
F2	46,2	23,6	3,2	45,0	7,8	0,631	0,103
F5	52,5	27,5	5,5	50,0	6,0	0,718	0,096
F6	75,5	36,0	9,5	79,0	8,6	0,565	0,048
F7	102,5	40,0	13,5	125,0	7,4	0,769	0,108
F8	55,0	28,0	5,5	54,5	8,6	0,497	0,112
F9	68,5	43,0	3,5	51,0	7,2	0,631	0,140
F10	85,7	42,5	5,0	86,5	6,4	0,826	0,145
F11	39,7	21,3	2,0	36,7	8,4	0,561	0,111
F12	32,4	18,8	1,3	27,2	8,1	0,451	0,121
Padrão	44,5-60,0	23,5-35,0	2,0-3,5	39,0 – 49,0	6,0-7,2	0,400-0,550	0,090-0,120

Sendo: VA - viscosidade aparente; VP - viscosidade plástica; FG - força gel; LE- limite de escoamento; VF - volume de filtrado; ER - espessura do reboco e CL – coeficiente de lubrificidade.

Os valores de VF foram reduzidos com o aumento da concentração do redutor de filtrado, como esperado. Comparando os valores do VF dos fluidos F11, F2, F9 e F10, que apresentam em sua formulação as concentrações de 2,5, 3,0, 4,0 e 5,0 g/ 350 mL de água, apresentaram os valores de 8,4, 7,8, 7,2 e 6,4 mL, respectivamente, ou seja, com o aumento da concentração do redutor de filtrado há uma redução nos valores de VF, comprovando a função deste aditivo. Porém, além da redução em VF com o aumento da concentração do redutor de filtrado, observou-se um aumento significativo nos valores das propriedades reológicas.

Este comportamento pode ser justificado pela composição do redutor de filtrado, que é composto por um polímero à base de celulose, o carboximetilcelulose (CMC) de baixa viscosidade, e este aditivo foi fabricado com uma celulose de melhor qualidade, comumente utilizada na fabricação de CMCs viscosificantes, bem como possui tamanho de cadeia maior que o das celuloses tradicionalmente utilizadas na fabricação de CMCs utilizados como redutores de filtrado. Sendo assim, quando a concentração ultrapassa 3,0 g/ 350 mL

de água, esse aditivo passa a agir como viscosificante, justificando os altos valores das propriedades reológicas observados para os fluidos tratados com as concentrações de 3,5, 4,0 e 5,0 g/ 350 mL de água de redutor de filtrado.

Os valores de ER e de CL não apresentaram variações significativas com o aumento das concentrações do viscosificante e do redutor de filtrado.

Comparando os resultados dos fluidos estudados com os obtidos a partir do fluido Padrão apresentados na Tabela 6, observou-se que os valores de VA, VP, FG, LE e CL do fluido F2 encontram-se próximos ao fluido de referência, sendo este fluido o que apresentou melhores resultados. Os demais fluidos não apresentaram propriedades de acordo com os valores do fluido Padrão. Os valores obtidos para VF e ER do fluido F2 ainda estão acima dos valores de referência.

3.2.3. Influência do lubrificante

Na Tabela 7 estão apresentadas as formulações

Tabela 7: Formulações dos fluidos com variação na concentração do lubrificante.

Componentes	F13	F2	F14	F15
Água (mL)	350	350	350	350
Anti-espumante (gotas)	6	6	6	6
Viscosificante (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Inibidor I (g)	21,0	21,0	21,0	21,0
Inibidor II (g)	12,0	12,0	12,0	12,0
Inibidor III (g)	-	-	-	-
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	-	1,0	1,5	2,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0

dos fluidos nas quais foi variada a concentração do lubrificante, com o objetivo de se estudar a melhor concentração deste aditivo e sua influência nas formulações. As propriedades reológicas, de filtração e de lubricidade obtidas com os fluidos estudados estão apresentadas na Tabela 8. Comparando os resultados

apresentados pelos fluidos F13, F2, F14 e F15, que contém as concentrações de 0, 1,0, 1,5 e 2,0 % de lubrificante em suas formulações, respectivamente, observou-se variação pouco significativa para os valores das propriedades reológicas com o aumento da concentração do aditivo.

Tabela 8: Propriedades reológicas, de filtração e de lubricidade dos fluidos com variação da concentração do lubrificante.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	FG (cP)	LE (N/m²)	VF (mL)	ER (mm)	CL
F13	42,5	23,0	2,0	39,0	7,6	0,432	0,297
F2	46,2	23,6	3,2	45,0	7,8	0,631	0,103
F14	46,1	23,8	3,0	44,7	7,7	0,553	0,128
F15	51,2	28,0	3,7	46,4	7,2	0,562	0,106
Padrão	44,5-60,0	23,5-35,0	2,0-3,5	39,0-48,0	6,0-7,2	0,400-0,550	0,090-0,120

Sendo: VA - viscosidade aparente; VP - viscosidade plástica; FG - força gel; LE- limite de escoamento; VF - volume de filtrado; ER - espessura do reboco e CL – coeficiente de lubricidade.

A VA do fluido F13, preparado sem lubrificante, foi de 42,5 cP, valor inferior aos dos outros fluidos estudados, que apresentaram valores próximos a 46,0 cP, com exceção do fluido F15, que apresentou VA de 51,2 cP. O mesmo comportamento pode ser observado com os valores de VP, de FG e de LE. O VF e ER também não apresentaram variações significativas com o aumento da concentração do lubrificante.

Os valores de CL sofreram redução com a adição do lubrificante aos fluidos, confirmando a eficiência do aditivo estudado, como observado para o fluido F13 que não apresenta lubrificante em sua formulação e apresentou CL de 0,297, e o fluido F2 que apresenta uma concentração de 1,0 % do lubrificante em sua formulação e apresentou CL de 0,103. Com o aumento da concentração do lubrificante (de 1,0 para 1,5 e 2,0 %), observou-se que o CL apresentou valores de 0,103, 0,128 e 0,106, respectivamente, comprovando mais uma vez a eficiência deste aditivo e que a concentração de 1,0 % é suficiente para promover uma adequada lubricidade ao fluido.

A característica lubrificante é uma importante propriedade para os fluidos de perfuração, visto que uma boa lubrificação promove uma alta eficiência na perfuração e diminui o desgaste da broca de perfuração. Estudos comprovam que fluidos de alto desempenho base óleo, que são tidos como bons lubrificantes, apresentam coeficientes de lubricidade em torno de 0,110 [13]. O coeficiente de lubricidade dos fluidos estudados com 1,0% do lubrificante foi de 0,103, comprovando mais uma vez a eficiência deste aditivo.

O lubrificante estudado é composto por um tensoativo de peso molecular elevado (em torno de 800 g/mol) e possui dipolos e cargas. Assim, ele forma um filme sobre as superfícies capaz de interações mais fortes que os óleos comuns e proporciona menores e melhores valores de CL. Com a formação do filme, a quantidade necessária para agir como lubrificante encontra-se em um máximo; no caso em estudo esse máximo foi de 1,0 %, e a partir desta concentração podem ter início outras interações no fluido que diminuem a sua atuação na formação de um duplo filme, justificando assim os valores maiores de CL para os fluidos tratados com 1,5 e 2,0 % de lubrificante.

Comparando os resultados dos fluidos estudados com os obtidos a partir do fluido Padrão, apresentados na Tabela 8, observou-se que os valores VA, VP, FG, LE e CL dos fluidos F2, F14 e F15 encontram-se próximos ao fluido de referência. Os valores obtidos para VF e ER do fluido F2 ainda estão acima dos valores de referência.

3.2.4. Influência dos inibidores de argilas expansivas

Neste item foram estudadas as formulações apresentadas na Tabela 9, nas quais foram variadas as concentrações dos inibidores de argila expansiva I, II e III, com o objetivo de se estudar a melhor concentração destes aditivos e suas influências nas formulações. Comparando os resultados obtidos com os fluidos F16, F17, F18 e F19 apresentados na Tabela 10, não foram observadas variações significativas nas propriedades estudadas. Foi observado que as propriedades dos fluidos são

influenciadas pela presença dos aditivos inibidores de argilas expansivas e não pela sua concentração.

Tabela 9: Formulações dos fluidos com variação nas concentrações dos inibidores de argilas expansivas.

Componentes	F16	F17	F18	F19
Água (mL)	350	350	350	350
Anti-espumante (gotas)	6	6	6	6
Viscosificante (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH (g)	1,0	1,0	1,0	1,0
Inibidor argila expansiva I (g)	21,0	21,0	21,0	-
Inibidor argila expansiva II (g)	8,0	-	-	-
Inibidor argila expansiva III (g)	-	12,0	8,0	12,0
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	2,0	1,0	2,0
Selante (g)	20,0	15,0	20,0	15,0

Com o objetivo de desenvolver fluidos ambientalmente corretos, o fluido F19 foi formulado contendo apenas o inibidor III, que trata-se de um inibidor orgânico, biodegradável e atóxico, já que os inibidores I e II, são respectivamente o KCl e um inibidor à base de um sal quaternário de amônio, sendo assim, não corretos ambientalmente.

De maneira geral, a utilização do inibidor III promoveu alterações pouco significativas nas propriedades reológicas, de filtração e de

lubricidade dos fluidos em comparação com os fluidos formulados com os inibidores I e II.

Comparando os resultados dos fluidos desenvolvidos neste trabalho com os obtidos a partir do fluido Padrão (Tabela 10), observou-se que os valores de VA, VP, FG, LE, VF e CL de todos os fluidos estudados encontram-se próximos aos da faixa de valores do fluido de referência. Os valores de ER ainda encontram-se superiores ao apresentado pelo fluido padrão.

Tabela 10: Propriedades reológicas, de filtração e de lubricidade dos fluidos com variação das concentrações dos inibidores de argilas expansivas.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	FG (cP)	LE (N/m ²)	VF (mL)	ER (mm)	CL
F16	47,0	26,0	2,5	42,0	6,6	0,812	0,110
F17	51,3	28,5	3,5	45,5	6,8	0,574	0,103
F18	44,0	24,0	2,5	40,0	6,8	0,480	0,140
F19	56,3	30,0	2,0	52,5	7,2	0,595	0,102
Padrão	44,5-60,0	23,5-35,0	2,0-3,5	39,0-48,0	6,0-7,2	0,400-0,550	0,090-0,120

Sendo: VA - viscosidade aparente; VP - viscosidade plástica; FG - força gel; LE- limite de escoamento; VF - volume de filtrado; ER - espessura do reboco e CL - coeficiente de lubricidade.

3.2.5. Influência do Selante

Neste item foram estudadas as formulações F2 e F20, apresentadas na Tabela 11, nas quais foi

variada a concentração do selante, com o objetivo de se estudar a melhor concentração deste aditivo e sua influência nas formulações.

Tabela 11: Formulações dos fluidos com variação na concentração do selante.

Componentes	F2	F20
Água (mL)	350	350
Anti-espumante (gotas)	6	6
Viscosificante (g)	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,0
Controlador de pH (g)	1,0	1,0
Inibidor argila expansiva I (g)	21,0	21,0
Inibidor argila expansiva II (g)	12,0	12,0
Inibidor argila expansiva III (g)	-	-
Bactericida (g)	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	30,0

Na Tabela 12 estão apresentadas as propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade obtidas com os fluidos estudados. Comparando o fluido F2 com o fluido F20 que apresentam na sua formulação a mesma composição, com diferença apenas na concentração do selante (respectivamente 15,0 e 30,0 g / 350 mL de água) observou-se que as propriedades reológicas (VA, VP, FG e LE), ER e CL não apresentaram alteração significativa e os

valores de VF e de ER apresentaram uma redução com o aumento da concentração do selante (calcita). Esse comportamento está de acordo com o esperado, visto que o selante tem como função auxiliar na redução das perdas por filtração, ou seja, reduzir o filtrado. Essa redução pode ser observada para os fluidos F2 e F10, que apresentaram redução de VF de 7,8 para 7,0 mL.

Tabela 12: Propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade dos fluidos com variação da concentração do selante.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	FG (cP)	LE (N/m ²)	VF (mL)	ER (mm)	CL
F2	46,2	23,6	3,2	45,0	7,8	0,631	0,103
F20	53,0	29,0	4,3	48,0	7,0	0,589	0,120
Padrão	44,5-60,0	23,5-35,0	2,0-3,5	39,0-48,0	6,0-7,2	0,400-0,550	0,090-0,120

Sendo: VA - viscosidade aparente; VP - viscosidade plástica; FG - força gel; LE- limite de escoamento; VF - volume de filtrado; ER - espessura do reboco e CL – coeficiente de lubrificidade.

Comparando os resultados dos fluidos desenvolvidos com os obtidos a partir do fluido Padrão (Tabela 12), observou-se que os valores de VA, VP, FG, LE, VF e CL dos dois fluidos estudados encontram-se próximos aos da faixa de valores do fluido de referência. Os valores de ER ainda encontram-se superiores ao apresentado pelo fluido Padrão.

Em paralelo a esse estudo, estão sendo desenvolvidas novas formulações, nas quais serão avaliadas outras concentrações de inibidores de argila com o objetivo de avaliar a ação destes aditivos.

É importante ressaltar que este estudo foi realizado com os fluidos a temperatura ambiente. Estão sendo realizados os ensaios com os fluidos após envelhecimento dinâmico a 200°F por 16 horas. Esta etapa é de grande importância visto que os fluidos de alto desempenho devem ser empregados também sob condições de altas temperatura e pressão.

4. Conclusões

Com o objetivo de desenvolver formulações de fluidos aquosos para perfuração de poços de petróleo e avaliar seu comportamento reológico, de filtração e de lubrificidade, conclui-se que:

- foram desenvolvidos com êxito fluidos de perfuração à base de água, a partir dos aditivos viscosificante, redutor de filtrado, anti-espumante, controlador de pH, inibidores de argilas expansivas, bacterida, lubrificante e selante para utilização em operações de perfuração de poços de petróleo;

- todos os fluidos apresentaram comportamento de fluidos pseudoplásticos;

- de acordo com a influência do anti-espumante, foi observado que 6 gotas no início da preparação do fluido é a melhor concentração do aditivo, sendo suficiente para a obtenção de fluidos com uma menor quantidade de espuma;

- o redutor de filtrado, a partir da concentração de 3,5 g/ 350 mL de água age como viscosificante, aumentando significativamente os valores das viscosidades aparente e plástica, limite de escoamento e força-gel, sendo 3,0 g/ 350 mL de água a concentração adequada deste aditivo, promovendo melhores resultados de propriedades reológicas e de filtração;

- a presença do lubrificante melhora a lubrificidade dos fluidos, promovendo melhores coeficientes de lubrificidade, fazendo com que todos os fluidos apresentem excelentes valores de coeficiente de lubrificidade, e a menor concentração estudada (1,0 %) é suficiente para promover uma lubrificidade adequada aos fluidos;

- a espessura do reboco apresentada foi pequena para todos os fluidos, características de fluidos poliméricos;

- os fluidos desenvolvidos apresentaram comportamento reológico e de lubrificidade próximos ao fluido Padrão;

- os valores de volume de filtrado e espessura do reboco dos fluidos estudados ainda estão acima dos valores apresentados pelo fluido Padrão.

Em resumo, dentre as 20 formulações desenvolvidas, oito (F2, F14, F15 F16, F17, F18, F19 e F20) apresentaram melhores resultados, com propriedades reológicas, de filtração e lubrificidade próximas aos do fluido Padrão utilizado como referência. Com essas formulações será realizada a

segunda etapa deste trabalho, como foi mencionado anteriormente.

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo - ANP, ao PRH-25, à FINEP, ao CTBRASIL, ao CTPETRO, ao CNPq (Processo No 472188/2006-2 e Processo No 010592/2006-2) pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de Iniciação Científica, à System Mud Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento dos aditivos estudados e ao LABDES pelo uso de suas instalações físicas.

Referências

- [1] Veiga, L. F. Estudo da Toxicidade Marinha de Fluidos de Perfuração de Poços de Óleo e Gás. Dissertação de Mestrado. Niterói, Rio de Janeiro: UFF, 1998.
- [2] Dyke, V. Drilling Fluids. Rotary Drilling Series, Unit II, Lesson 2. First Edition, Austin, Texas, 2000.
- [3] Darley, H.C.H e Gray, G.R., Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids, Fifth Edition, Gulf Publishing Company, 1988.
- [4] Lummus, J. L. e Azar, J. J., Drillings Fluids Optimization A Pratical Field Approach, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.
- [5] Tehrani, M. A.; Popplestone, A.; Guarneri, A. E Carminati, S.; Water- Based Drilling Fluid for HP/ HT Applications. In: International Symposium on Oilfield Chemistry, Texas, USA, 2007.
- [6] Duarte, R. G. Avaliação da Interação Folhelho-Fluido de Perfuração para Estudos de Estabilidade de Poços. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil. 2004.
- [7] Trenery, J.; Mullen, G.; Water-based fluid performs like oil-based mud. Disponível em <http://www.eandpnet.com/area/exp/744.htm>. Acesso em fevereiro de 2008.
- [8] Felix, T. F.; Vidal, E. L. F.; Garcia, R. B.; Costa, M.; Girão, J. H; Pereira, E.; Desenvolvimento de fluidos de perfuração à base de água com alta capacidade de inibição e alta lubrificidade. 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007.
- [9] Machado, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.
- [10] PETROBRAS, Ensaio de Viscosificante para Fluido de Perfuração Base de Água na Exploração e Produção de Petróleo, Método, N-2605, 1998.
- [11] Farias, K.V., Influência de Umectante Aniônico na Reologia e Espessura de Reboco de Fluidos Hidroargilosos, Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Química, CCT/UFMG, Campina Grande, Novembro de 2005.
- [12] I. R. Oliveira, A. R. Studart, R. G. Pileggi, V. C. Pandolfelli, Dispersão e empacotamento de partículas - princípios e aplicações em processamento cerâmico, Fazendo Arte Editorial, S. Paulo, Brasil (2000)
- [13] Vidal, E. L. F.; Félix, T. F.; Garcia, R. B. ; Costa, M. Girão, J. H. S.; Aplicação de Novos Polímeros Catiônicos como Inibidores de Argila Em Fluidos de Perfuração à Base de Água. In: 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007.