

**FLUIDOS AQUOSOS AMBIENTALMENTE CORRETOS PARA
PERFURAÇÃO DE POÇOS ARTESIANOS E DE PETRÓLEO**

Aline Raquel V. Silva¹; Kássie Vieira Farias²; Luciana Viana Amorim³ e Eugênio Pereira⁴

Resumo – Este trabalho tem como objetivo desenvolver formulações de fluidos de perfuração à base de água, ambientalmente corretos, para utilização nas operações de perfuração de poços artesianos e de petróleo. Para tanto, foram desenvolvidas vinte e duas formulações contendo diversos aditivos e avaliado o comportamento reológico, de filtração e a lubricidade dos fluidos a temperatura ambiente. Os fluidos foram preparados de acordo com a prática de campo que consiste em adicionar à água os aditivos sob agitação constante. Após 24 h de repouso, foram determinadas as curvas de fluxo, as viscosidades aparente e plástica, o limite de escoamento, a força gel, o coeficiente de lubricidade, o volume de filtrado e a espessura do reboco. Os resultados mostraram que fluidos ambientalmente corretos foram desenvolvidos com êxito e que dentre as formulações desenvolvidas, três encontram-se dentro dos valores de referência do fluido Padrão e quatorze foram classificados como promissores, por apresentarem propriedades muito próximas ao fluido de referência.

Abstract –This work has the aim to develop formulations of water-based drilling fluids, environmentally safe, for use in operations of perforation of artesian and oil well. For in such a way, twenty-two formularizations with diverse additives had been developed and had been evaluated the rheologic, filtration and lubrication behavior in ambient temperature. The fluids were prepared according to the field practice that consists of adding to water the additives under constant agitation. After 24h resting, they had been determined the flow curves, the apparent and plastic viscosities, the yield limit, the gel force, the lubricity coefficient, the filtered volume and the filter-cake thickness. The results showed that environmentally safe drilling fluidos had been developed with success and amongst the developed formulations, three had presented performance next to the reference fluid.

Palavras-chave: Fluidos de perfuração, aditivos, meio ambiente.

¹ Aluna do Curso de Engenharia de Materiais, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, UFCG, Campina Grande, PB, E-mail: alinemateriais@yahoo.com.br

² Doutoranda em Engenharia de Processos/CCT/UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande, PB, Fone: 83-3310-1106, Bolsista PRH-25/ANP, E-mail: kassievieira@hotmail.com

³ Pesquisadora Visitante, ANP/PRH-25/UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, 58109-970, Campina Grande, PB, Fone: 83-3310-1106, E-mail: luciana@cct.ufcg.edu.br

⁴ Diretor Técnico, System Mud Indústria e Comércio Ltda., Rua Otávio Muller, 204, Ressacada, 88307-610, Itajaí, SC, Fone: 47-2103-5020, E-mail: eugenio@systemud.com.br

1- INTRODUÇÃO

Os fluidos de perfuração são tradicionalmente classificados de acordo com o seu constituinte principal, em: fluidos à base de gás, fluidos à base de água e fluidos à base de óleo. 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 [1,2].

Segundo Lummus e Azar [2], os aditivos para fluidos são classificados em viscosificantes, agentes densificantes, redutores de filtrado, defloculantes, emulsificantes e aditivos especiais. Os viscosificantes têm a função de aumentar a viscosidade do fluido, como a bentonita, atapulgita e polímeros naturais e sintéticos. Os agentes densificantes aumentam a densidade da lama, sendo a barita ($BaSO_4$) o mais utilizado. Os redutores de viscosidade (defloculantes ou dispersantes) e de perda de fluido são adicionados aos fluidos com a função de reduzir a viscosidade e o volume de filtrado, respectivamente. Os emulsificantes facilitam o mecanismo de dispersão de dois líquidos imiscíveis, estabilizando a emulsão. Como aditivos especiais, estão incluídos flocculantes, controladores de pH, anti-espumantes, lubrificantes, bactericidas, dentre outros.

Especialistas em fluidos de perfuração visam desenvolver e selecionar aditivos que melhorem o desempenho dos fluidos, aumentando assim a taxa de penetração, e reduzam os problemas causados pela contaminação de zonas produtoras de água e de petróleo, bem como os problemas ambientais gerados pelo descarte do fluido ou mesmo pela contaminação dos detritos de perfuração. Segundo England [3], esta escolha é baseada nos seguintes parâmetros: custo, desempenho, qualidade, efeitos ambientais, compatibilidade da avaliação da produção e da exploração e logística.

Para minimizar os impactos ambientais é necessário reduzir os níveis de toxicidade dos componentes dos fluidos de perfuração. Durante muitos anos foram utilizados os fluidos à base de óleo, considerados como adequados a situações nas quais os fluidos de base aquosa sofrem limitações e por apresentarem vantagens como elevada lubrificidade, contudo, em virtude dos impactos ambientais sua utilização tem se tornado cada vez mais restrita. Assim, os fluidos à base de água, considerados menos agressivos ao meio ambiente e de menor custo, surgem como alternativa [4].

Com isso, este trabalho tem como objetivo desenvolver formulações de fluidos de perfuração de base aquosa, ambientalmente corretos, para perfuração de poços artesianos e de petróleo e avaliar seu comportamento reológico, as propriedades de filtração e a sua capacidade lubrificante.

2 - MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 - Materiais

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

Foram estudadas três amostras de inibidores de argilas expansivas, denominadas de Inibidor I (inibidor inorgânico – KCl), Inibidor II (inibidor à base de um sal quaternário de amônio) e Inibidor III (inibidor orgânico, biodegradável e atóxico).

As amostras de viscosificante, anti-espumante, bactericida, lubrificante, redutor de filtrado, controlador de pH e selante são produtos biodegradáveis e atóxicos.

As amostras dos aditivos foram fornecidas pela Empresa System Mud Indústria e Comércio Ltda., localizada na Rua Otávio Muller, 204, Carvalho, Itajaí, SC.

Foi utilizada uma argila industrializada, conhecida comercialmente por Brasgel PA, para a realização dos ensaios do grau de inibição, descritos no item Métodos. A argila foi fornecida pela empresa Bentonit União Nordeste Ltda- BUN, situada na Avenida Assis Chateaubriand, 3877, Campina Grande, PB.

2.2 - Métodos

Foram desenvolvidas vinte e duas (22) formulações de fluidos de perfuração base água, nas quais foram variadas as concentrações do viscosificante, redutor de filtrado, inibidores de argilas expansivas (Inibidores I, II e III), lubrificante e selante. As formulações estão apresentadas nas Tabelas 1, 2 e 3.

Tabela 1. Formulações dos fluidos base água do Grupo A.

ADITIVOS	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
Água (mL)	350	350	350	350	350	350	350	350
Anti-espumante (gts)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Viscosificante (g)	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH(g)	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
Inibidor II (g)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	10,0	8,0
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Tabela 2. Formulações dos fluidos base água do Grupo B.

ADITIVOS	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
Água (mL)	350	350	350	350	350	350	350	350
Anti-espumante (gts)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Viscosificante (g)	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH(g)	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
Inibidor III (g)	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	10,0	8,0
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0	20,0	20,0	20,0	20,0

Tabela 3. Formulações dos fluidos base água do Grupo C.

ADITIVOS	F17	F18	F19	F20	F21	F22
Água (mL)	350	350	350	350	350	350
Anti-espumante (gts)	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Viscosificante (g)	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,0
Redutor de filtrado (g)	3,0	3,5	3,0	3,0	3,0	3,0
Controlador de pH(g)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Inibidor III (g)	12,0	12,0	12,0	12,0	10,0	8,0
Bactericida (g)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
Lubrificante (%)	1,0	1,0	1,5	2,0	1,0	1,0
Selante (g)	15,0	15,0	15,0	15,0	20,0	20,0

As formulações foram divididas em grupos (Grupos A, B e C) de acordo com a aplicação dos Inibidores I, II e III; os fluidos do Grupo A contêm os Inibidores I e II, os fluidos do Grupo B contêm os Inibidores I e III, enquanto que os fluidos do Grupo C, apenas o Inibidor III.

Foi também estudado um fluido denominado de Padrão, cuja formulação e aditivos foram fornecidos pela PETROBRAS.

2.2.1 - Preparação dos 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. Os aditivos foram adicionados obedecendo a ordem em que se encontram nas Tabelas 1, 2 e 3. 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.

2.2.2 - Estudo Reológico

Foi realizado o estudo do comportamento reológico em viscosímetro Fann 35A por meio da determinação das curvas de fluxo, das viscosidades aparente e plástica e da força gel. Para tanto, 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 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 [5]. Neste equipamento, seis valores de torque foram lidos com taxas de cisalhamento variando de $5,1 \text{ s}^{-1}$ a 1022 s^{-1} . O equipamento foi acionado na velocidade de 600 rpm durante 2 min e efetuado 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, 60 rpm e 30 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, agitou-se o fluido na velocidade de 600 rpm durante 15 seg, mudou-se a velocidade para 30 rpm e deixou o fluido em repouso durante 10 seg e fez-se a leitura obtendo o valor da força gel inicial. Em seguida, para a obtenção da força gel final, o fluido foi deixado em repouso durante 10 min e efetuada a leitura na velocidade de 30 rpm.

As viscosidades aparente e plástica e o limite de escoamento foram obtidos segundo a norma N-2605 da PETROBRAS [6]. A viscosidade aparente (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 limite de escoamento (LE) é a diferença entre a leitura obtida a 300 rpm e a viscosidade plástica (VP).

2.2.3 - Coeficiente de Lubricidade

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 e efetuada a leitura após 5 min. O coeficiente de lubrificidade (CL) é calculado a partir das seguintes equações matemáticas.

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

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

Sendo:

FC = fator de correção;

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

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

CL = coeficiente de lubricidade (adimensional).

2.2.4 - Determinação do Volume de Filtrado

O volume de filtrado API foi obtido em filtros-prensa Fann segundo a norma N-2605 da PETROBRAS [6], com aplicação de uma pressão da ordem de 7,0 kgf/cm² (100 psi) durante 30 minutos. Os resultados são expressos em mL.

2.2.5 - Determinação da Espessura do Reboco

Para a determinação da espessura do reboco foi seguida uma metodologia desenvolvida por Farias [7], 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.

2.2.6 - Ensaio do Grau de Inibição

Com o objetivo de avaliar a capacidade de inibição de argilas expansivas dos inibidores químicos, isolados e em conjunto, foi determinado, qualitativamente, o grau de inibição de argila utilizando a metodologia de inchamento de Foster [8]. Para tanto, em uma proveta de 100mL de capacidade contendo 50 mL da suspensão de água e inibidores nas concentrações estudadas (Tabela 4) foi adicionado lentamente 1g de argila bentonítica ativada. Os sistemas foram deixados em repouso e após 1, 2, 3, 18 e 24h foram efetuadas as leituras do inchamento.

Tabela 4. Concentrações dos inibidores de argilas expansivas estudadas.

Inibidores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Inibidor I*	-	-	-	21,0	21,0	21,0	21,0	-	-	-
Inibidor II*	8,0	10,0	12,0	8,0	10,0	12,0	-	-	-	-
Inibidor III*	-	-	-	-	-	-	-	8,0	10,0	12,0

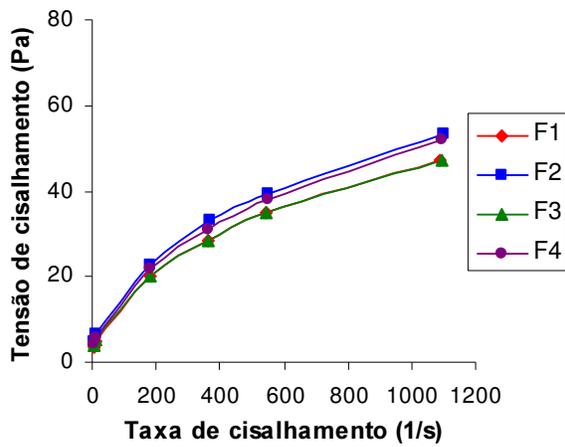
*(g/350mL de água)

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

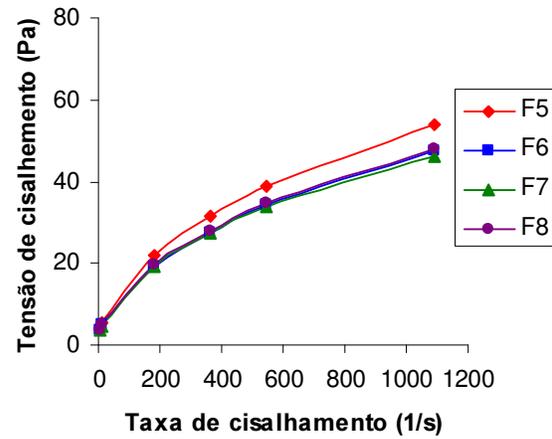
3.1 - Classificação dos fluidos quanto ao comportamento reológico

As curvas de fluxo dos fluidos preparados a partir das formulações dos Grupos A (Tabela 1), B (Tabela 2) e C (Tabela 3) estão apresentadas na Figura 1.

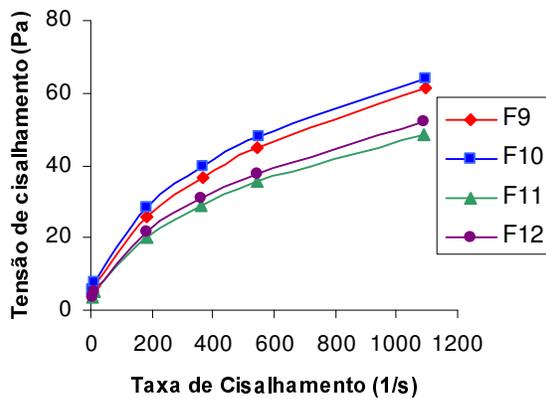
Observou-se que as curvas de fluxo de todos os fluidos apresentaram comportamento pseudoplástico com limite de escoamento. Este tipo de comportamento pode ser causado por diversos fatores, dentre os quais as características físicas das partículas, como sua área superficial, formato e dimensões; o tipo 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 [9].



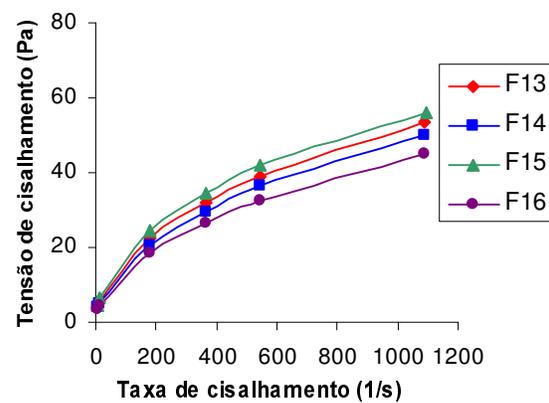
(a)



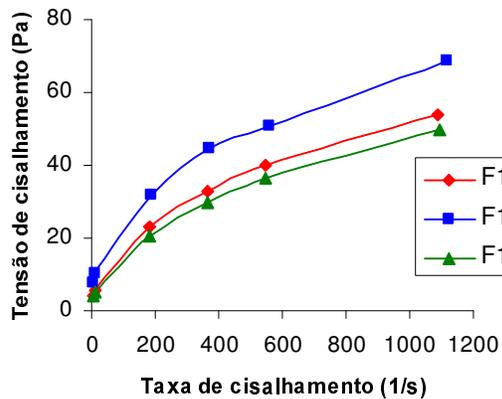
(b)



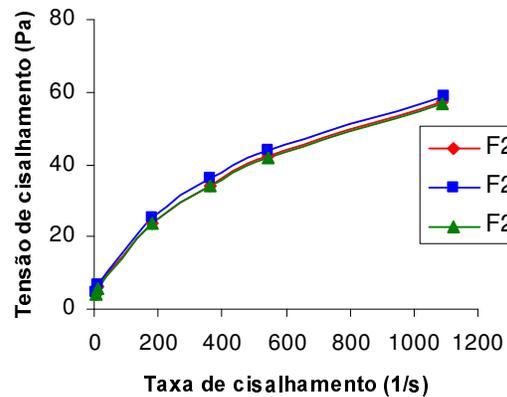
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 1: Curvas de fluxo dos fluidos: (a) F1, F2, F3 e F4, (b) F5, F6, F7 e F8, (c) F9, F10, F11 e F12, (d) F13, F14, F15 e F16, (e) F17, F18 e F19 e (f) F20, F20 e F22 preparados a partir das formulações dos Grupos A, B e C.

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 (R^2), os índices de comportamento de fluxo (n) e os índices de consistência do fluido (K) dos fluidos desenvolvidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Equação da curva, coeficiente de determinação (R^2), índice de comportamento de fluxo (n) e índice de consistência do fluido (K) preparados a partir das formulações dos Grupos A, B e C.

FLUIDO	EQUAÇÃO	R^2	K	N
F1	$y = 1,5331x^{0,4936}$	0,9997	1,5331	0,4936
F2	$y = 2,1682x^{0,4583}$	0,9995	2,1682	0,4583
F3	$y = 1,6568x^{0,4803}$	0,9997	1,6568	0,4803
F4	$y = 1,8779x^{0,4748}$	0,9998	1,8779	0,4748
F5	$y = 1,8035x^{0,4850}$	0,9998	1,8035	0,4850
F6	$y = 1,5234x^{0,4914}$	0,9998	1,5234	0,4914
F7	$y = 1,4740x^{0,4937}$	0,9998	1,4740	0,4937
F8	$y = 1,5160x^{0,4945}$	0,9998	1,5160	0,4945
F9	$y = 2,1160x^{0,4826}$	0,9999	2,1160	0,4826
F10	$y = 2,5379x^{0,4634}$	0,9999	2,5379	0,4634
F11	$y = 1,6358x^{0,4862}$	0,9996	1,6358	0,4862
F12	$y = 1,6447x^{0,4957}$	0,9999	1,6447	0,4957
F13	$y = 1,7648x^{0,4893}$	0,9999	1,7648	0,4893
F14	$y = 1,6215x^{0,4914}$	0,9997	1,6215	0,4914
F15	$y = 2,0459x^{0,4767}$	0,9997	2,0459	0,4767
F16	$y = 1,4191x^{0,4952}$	0,9999	1,4191	0,4952
F17	$y = 1,7512x^{0,4943}$	0,9997	1,7512	0,4943
F18	$y = 3,7426x^{0,4140}$	0,9996	3,7426	0,4140
F19	$y = 1,7560x^{0,4776}$	0,9994	1,7560	0,4776
F20	$y = 1,8947x^{0,4895}$	0,9999	1,8947	0,4895
F21	$y = 2,0601x^{0,4827}$	0,9997	2,0601	0,4827
F22	$y = 1,8556x^{0,4912}$	0,9998	1,8556	0,4912

O coeficiente de determinação (R^2) 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.

O índice do comportamento de fluxo (n) foi em torno de 0,5. Este 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 1,41 para o fluido F16 a 3,74 para o fluido F18. Este 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 e de filtração dos fluidos de perfuração

As propriedades reológicas e de filtração e os coeficientes de lubrificidade obtidos com os fluidos formulados a partir do Grupo A, estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Propriedades reológicas e de filtração e coeficiente de lubrificidade dos fluidos do Grupo A.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	FG (cP)	CL	VF (mL)	ER (mm)
F1	46,2	23,6	45,0	3,2	0,103	7,8	0,631
F2	52,5	27,5	50,0	5,5	0,096	6,0	0,718
F3	46,1	23,8	44,7	3,0	0,128	7,7	0,553
F4	51,2	28,0	46,4	3,7	0,106	7,2	0,562
F5	52,7	29,1	47,2	1,5	0,101	8,4	0,812
F6	45,6	25,2	41,0	3,4	0,105	7,7	0,650
F7	45,1	24,3	41,7	3,2	0,115	7,6	0,895
F8	47,0	26,0	42,0	2,5	0,110	6,6	0,812
PADRÃO	44,5-60,0	23,5-35,0	39,0-49,0	2,0-3,5	0,09-0,12	6,0-7,2	0,400-0,550

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

O aumento da concentração dos aditivos viscosificante e redutor de filtrado no fluido F2 proporcionou aumento nos valores de VA, VP, LE e FG e redução no VF, comprovando sua eficiência e confirmando as funções para os quais são indicados.

Comparando os valores dos índices de consistência (K), apresentados na Tabela 5, com os valores de VA dos fluidos F1 a F8, observou-se que o maior valor de K (2,1682) foi obtido para o fluido F2 que apresentou maior viscosidade.

Os fluidos F5 e F6 apresentam mesma composição, sendo que o fluido F5 não apresenta em sua formulação o Inibidor I. A ausência deste aditivo, aparentemente, promoveu o aumento de VA, VP e LE e redução de FG no fluido F5.

Comparando os resultados obtidos com os fluidos F6, F7e F8 que apresentam em sua formulação concentrações decrescentes do Inibidor II (12,0, 10,0 e 8,0 g/350mL de água) e os demais aditivos nos mesmos teores, não se observam variações significativas nas propriedades estudadas. Este comportamento, bem como o citado acima com os fluidos F5 e F6, indicam que as propriedades dos fluidos base água são influenciadas pela presença de aditivos inibidores de argilas expansivas e não pela sua concentração.

Comparando os resultados dos fluidos do Grupo A com o fluido Padrão, observou-se que o fluido F4 apresenta propriedades reológicas, de filtração e lubricidade de acordo com a faixa de referência. Os demais fluidos (F1, F2, F3, F5, F6, F7 e F8) apresentaram VA, VP, LE, FG e CL de acordo com a faixa de valores do fluido Padrão, utilizado como referência. Apenas VF e ER não se enquadraram na faixa supracitada, contudo, apresentaram valores muito próximos.

As propriedades reológicas e de filtração e o coeficiente de lubricidade obtidos com os fluidos do Grupo B estão apresentados na Tabela 7.

Os fluidos do Grupo B foram preparados com as mesmas formulações dos fluidos do Grupo A, sendo que para o Grupo B foi utilizado o Inibidor III em substituição ao Inibidor II.

Tabela 7. Propriedades reológicas e de filtração e coeficiente de lubricidade dos fluidos do Grupo B.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	FG (cP)	CL	VF (mL)	ER (mm)
F9	60,0	32,0	56,0	3,5	0,058	7,2	0,223
F10	63,0	31,5	62,5	6,0	0,095	7,0	0,497
F11	47,8	25,5	44,5	2,5	0,096	7,5	0,363
F12	51,3	28,5	45,5	3,5	0,103	6,8	0,273
F13	52,3	28,0	48,0	2,0	0,040	7,4	0,604
F14	49,0	26,5	45,0	3,0	0,089	7,5	0,567
F15	54,8	27,0	55,5	3,5	0,085	6,6	0,225
F16	44,0	24,0	40,0	2,5	0,075	6,8	0,480
PADRÃO	44,5-60,0	23,5-35,0	39,0-49,0	2,0-3,5	0,09-0,12	6,0-7,2	0,400-0,550

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

Comparando os resultados obtidos com os fluidos F9 a F16 (Grupo B) com os fluidos F1 a F8 (Grupo A), observaram-se modificações nas propriedades VA, VP, LE e ER dos fluidos F9 e F10. De maneira geral, os fluidos deste Grupo apresentaram rebocos de menor espessura.

Assim como observado para os fluidos F6, F7 e F8 do Grupo A, os fluidos F14, F15 e F16 que apresentam em sua formulação concentrações decrescentes do Inibidor III (12,0, 10,0 e 8,0 g/350mL de água) e os demais aditivos nos mesmos teores, não se observam variações significativas nas propriedades estudadas, com exceção da VA (54,8 cP) do fluido F15 e, conseqüentemente, do LE (55,5 N/m²) que apresentaram valores mais elevados e da ER que apresentou valor bem inferior aos demais (0,225 mm).

Dentre os fluidos do Grupo B, o fluido F10 apresentou os maiores valores das propriedades reológicas, por apresentar a maior quantidade de viscosificante e redutor de filtrado.

Comparando os resultados dos fluidos F9 a F16 (Grupo B) com o fluido Padrão, observou-se que os fluidos F12 e F16 apresentaram propriedades de acordo com a faixa de valores do fluido Padrão. Os fluidos F11, F13 e F14 apresentaram VA, VP, LE, FG e CL de acordo com a faixa de referência, contudo, VF e ER encontram-se próximos. Apenas os fluidos F9, F10 e F15 não se enquadram na faixa de referência.

As propriedades reológicas e de filtração e o coeficiente de lubrificidade obtidos com os fluidos do Grupo C estão apresentados na Tabela 8.

Os fluidos do Grupo C foram formulados contendo apenas o Inibidor III. O Inibidor I foi excluído das formulações e o Inibidor III foi estudado nas mesmas concentrações do Inibidor II. Assim, as formulações são semelhantes às do Grupo II, contudo, excluindo o Inibidor I.

Neste Grupo de formulações objetivou-se desenvolver fluidos ambientalmente corretos, atendendo o objetivo deste trabalho, pelo uso apenas do Inibidor III, eliminando os Inibidores I e II, que são respectivamente o KCl e inibidor à base de um sal quaternário de amônio.

De maneira geral, a utilização do Inibidor III não promoveu alterações significativas nas propriedades dos fluidos em comparação com os fluidos do Grupo B.

Comparando os resultados obtidos com os fluidos F17 e F18 observou-se que o fluido F18 apresenta maiores valores de VA, VP, LE, FG, VF e ER. O aumento nos valores destas propriedades deve-se a maior concentração dos aditivos viscosificante e redutor de filtrado.

A partir deste comportamento e também dos apresentados pelos fluidos dos Grupos A e B fica evidenciado que as concentrações ideais para o viscosificante e para o redutor de filtrado são, respectivamente, 1,0 e 3,0g/350mL de água. Concentrações superiores a estas conduzem os fluidos a um estado de floculação, com elevados valores de viscosidade, força gel e limite de escoamento. Nestas condições, os fluidos de perfuração podem provocar diversos problemas durante a perfuração de poços, a exemplo da sobrecarga nos equipamento de perfuração, como as bombas de lama. Também como conseqüência do estado de floculação, tem-se um aumento no volume de filtrado e, por conseguinte, na espessura de reboco. Estes parâmetros se não bem controlados podem provocar danos às formações que estão sendo perfuradas e prisão da coluna de perfuração.

Tabela 8. Propriedades reológicas e de filtração e coeficiente de lubrificidade dos fluidos do Grupo C.

FLUIDOS	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	FG (cP)	CL	VF (mL)	ER (mm)
F17	53,0	27,5	51,0	3,0	0,047	7,8	0,544
F18	67,5	35,0	65,0	6,0	0,080	7,5	0,745
F19	48,8	26,0	45,5	1,5	0,085	7,6	0,552
F20	56,3	30,0	52,5	2,0	0,092	7,2	0,595
F21	57,5	29,0	57,0	3,0	0,092	7,5	0,303
F22	55,0	29,5	52,0	1,5	0,042	7,6	0,449
PADRÃO	44,5-60,0	23,5-35,0	39,0-49,0	2,0-3,5	0,09-0,12	6,0-7,2	0,400-0,550

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

Comparando o comportamento dos fluidos F20, F21 e F22, observou-se que praticamente não há variações nas propriedades dos fluidos em função da concentração do Inibidor III.

Comparando os fluidos do Grupo C (F17 a F22) com o fluido Padrão, observou-se que as formulações F17, F19, F20 e F22 apresentaram VA, VP, FG, CL e ER de acordo com a faixa de referência. Os valores de VF e LE estão muito próximos aos apresentados pelo fluido Padrão. Os fluidos F18 e F21 não se enquadram na faixa de referência.

A partir destes resultados, observou-se que é viável a substituição dos Inibidores I e II pelo Inibidor III, obtendo-se assim um fluido ambientalmente correto, bem como que variações na concentração do inibidor não provocam alterações significativas nas propriedades dos fluidos.

3.3 - Capacidade lubrificante

A concentração do lubrificante nos fluidos dos Grupos A, B e C foi variada de 1 a 2%. Observou-se que os coeficientes de lubrificidade (CL) dos fluidos do Grupo A foram próximos de 0,1 (Tabela 6), os dos fluidos do Grupo B (Tabela 7) variaram entre 0,040 (F13) a 0,103 (F12), enquanto que os dos fluidos do Grupo C (Tabela 8) apresentaram valores um pouco mais baixos, variando entre 0,042 (F22) a 0,092 (F20 e F21).

De maneira geral, os valores de CL independem da concentração do lubrificante. Esse comportamento mostra que a adição de apenas 1% de lubrificante contribui significativamente para a melhoria da lubrificidade dos fluidos.

Os fluidos desenvolvidos neste estudo, em especial os do Grupo C, apresentaram valores de CL inferiores e, portanto, melhores, aos obtidos pelo fluido Padrão. Esses resultados são também

inferiores ao coeficiente de lubricidade típico (0,15) de fluidos base óleo, reportado por Darley e Gray [1].

3.4 - Grau de inibição de argila

A partir dos ensaios para obtenção do grau de inibição de argilas expansivas, os Inibidores I, II e III, em todas as concentrações estudadas, se mostraram eficientes, uma vez que não foi observado o inchamento da argila ativada (por apresentarem inchamento nulo, os resultados não estão apresentados). Mesmo após longos períodos (18 e 24h), não foi observado o aumento no volume da argila ativada ou o seu inchamento, comprovando assim que os Inibidores estudados evitam o inchamento de argilas hidratáveis.

Fazendo uma análise conjunta dos resultados e comparando com os parâmetros de referência padrão apresentados por fluidos de perfuração preparados a partir de formulações e aditivos da PETROBRAS (fluido Padrão), observou-se que das 22 formulações desenvolvidas, 03 formulações (F4, F12 e F16) apresentaram propriedades reológicas (VA, VP, FG e LE), de filtração (VF e ER) e lubricidade (CL) de acordo com o Padrão. As formulações F1, F2, F3, F5, F6, F7, F8, F11, F13, F14, F17, F19, F20 e F22 foram classificadas como promissoras por apresentarem propriedades muito próximas ao fluido de referência. Apenas os fluidos F9, F10, F15, F18 e F21 foram classificados como fora dos padrões do fluido de referência.

4 - CONCLUSÕES

A partir deste estudo foram desenvolvidos com êxito fluidos de perfuração à base de água, ambientalmente corretos, a partir de aditivos (viscosificante, redutor de filtrado, anti-espumante, controlador de pH, inibidor de argilas expansivas, bacterida, lubrificante e selante) biodegradáveis e atóxicos para utilização em operações de perfuração de poços artesianos e de petróleo.

Dentre as 22 formulações estudadas, 03 apresentaram propriedades de acordo com o fluido Padrão e 14 foram classificadas como promissoras por apresentarem propriedades muito próximas ao fluido de referência.

5 - AGRADECIMENTOS

À Agência Nacional do Petróleo - ANP, ao PRH-25, à FINEP, ao CTBRASIL, ao CTPETRO, ao CNPq (Processo N° 472188/2006-2 e Processo N° 010592/2006-2) pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de Iniciação Científica, à Empresa Bentonit União Nordeste Ltda – BUN pelo

fornecimento da argila bentonítica, à System Mud Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento dos aditivos estudados e ao LABDES pelo uso de suas instalações físicas.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DARLEY, H.C.H e GRAY, G.R., **Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids**, Fifth Edition, Gulf Publishing Company, 1988.
- [2] LUMMUS, J.L e AZAR, J.J., **Drillings Fluids Optimization A Pratical Field Approach**, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.
- [3] ENGLAND, A.A., Chevron Services Co., **The Characterization of a Drilling Fluid Additive**, SPE/IADC Drilling Conference, 28 February-2 March, Dallas, Texas Copyright 1988.
- [4] AMORIM, L.V., **Melhoria, Proteção e Recuperação da Reologia de Fluidos Hidroargilosos para Uso na Perfuração de Poços de Petróleo**, Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, PB, dezembro de 2003. Orientadores: Profs. Heber Carlos Ferreira, Hélio de Lucena Lira e Kepler Borges França.
- [5] MACHADO, J. C. V. **Reologia e escoamento de fluidos**. Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.
- [6] PETROBRAS, **Viscosificante para Fluidos de Perfuração Base Água na Exploração e Produção de Petróleo**, Especificação, N-2604, 1998.
- [7] FARIAS, K.V., **Influência de Umectante Aniônico na Reologia e Espessura de Reboco de Fluidos Hidroargilosos**, Dissertação de Mestrado, Mestrado em Engenharia Química, CCT/UFCG, Campina Grande, Novembro de 2005. Orientadores: Prof. Dr. Heber Carlos Ferreira e Dra. Luciana Viana Amorim.
- [8] FOSTER, M. D. **Studies of Clay Minerals**. (II) Relation between ionic substitution and swelling in montmorillonite. Amer. Miner 38, pg. 994, 1953.
- [9] PANDOLFELLI, V.C. *et al.* **Dispersão e empacotamento de partículas**. Editora Fazendo Arte, São Paulo, 2000.