

Aplicação do planejamento experimental no estudo de fluidos inibidos isentos de cloro: Parte I

D. V. Lucena^{1*}; R. S. Leite²; L. V. Amorim³, H. L. Lira⁴

¹ Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais, Bolsista IBP/PRH-25/ANP/UFCG

² Graduação em Engenharia de Materiais, Bolsista PRH-25/ANP/UFCG

³ Departamento de Engenharia Mecânica, UFCG

⁴ Departamento de Engenharia de Materiais, UFCG

Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro: Universitário, CEP: 58109-900, Campina Grande – PB

(Recebido em 09/11/2010; revisado em 30/11/2010; aceito em 10/12/2010)

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

Resumo:

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de aditivos químicos (viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante e selante) nos parâmetros reológicos e de filtração em fluidos de perfuração aquosos inibidos com sal de potássio isento de cloro, utilizando planejamento fatorial do tipo 2^4 com três experimentos no ponto central. Os fluidos foram preparados com concentrações variando de 0,214 % a 0,428 % de viscosificante, 0,714 % a 1 % de redutor de filtrado, 1,0 % a 3,0 % de lubrificante e 4,28 % a 7,14% de selante e com concentração de 4,57 % em massa de inibidor. As viscosidades foram determinadas em viscosímetro Fann modelo 35 A. Através da regressão dos dados experimentais, observou-se que os valores de viscosidade aparente e plástica variaram com a concentração dos aditivos, aumentando com o aumento da concentração dos mesmos, e que o aumento da concentração dos aditivos promoveu uma diminuição dos valores dos parâmetros de filtração. O redutor de filtrado foi a variável que apresentou maior influência sobre as propriedades dos fluidos.

Palavras-chave: Parâmetros reológicos; fluidos inibidos; planejamento fatorial.

Abstract:

The aim of this work is to evaluate the influence of the chemical additives variation (viscosifier, filtrate reducer, lubricant and sealant) in the rheological and filtration properties of inhibitive water-based drilling fluids with potassium salt without chlorine, using a factorial plan 2^4 type with three experiments in the central point. The fluids were prepared with concentration changing from 0,214 % a 0,428 % of viscosifier, from 0,714 % a 1 % of filtrate reducer, from 1.0% to 3.0% of lubricant, from 4,28 % a 7,14% of sealant and 4,57 % of inhibitor/350ml of water. . From the results of experimental data regression it was observed that the values of apparent and plastic viscosities change with the additives content, that is, an increase in the additive concentration increase the viscosities and decrease the values of filtration parameters. The filtrate reducer was the variable that conferred great influence in the fluid properties.

Keywords: Rheological parameters; inhibitors fluids; factorial plan.

1. Introdução

Durante a perfuração de poços de petróleo é necessária a utilização de fluidos de perfuração, cuja composição química depende do comportamento físico-químico desejado. As principais funções desses fluidos são: controlar as pressões no interior do poço, inibir o inchamento de formações hidratáveis para que não ocorram desmoronamentos e prisão da coluna de perfuração, limpar o poço, transportando os detritos até a superfície e resfriar e lubrificar a coluna de perfuração e a broca [1].

Os fluidos de perfuração apresentam várias propriedades físico-químicas que devem ser levadas em consideração durante sua aplicação, podendo-se destacar os parâmetros reológicos que influenciam diretamente no cálculo das perdas de carga nas tubulações e na limpeza do poço.

No campo, as propriedades reológicas de interesse, que se encontram vinculadas ao desempenho do fluido são: viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento e força gel [2].

A capacidade do fluido de perfuração em formar uma camada de partículas sólidas, denominada reboco, sobre as

*Email: daniellymateriais@yahoo.com.br (D. V. Lucena)

rochas permeáveis expostas pela broca é de fundamental importância para o sucesso da perfuração. Para formar o reboco, deve haver o influxo da fase contínua do fluido do poço para a formação. Esse processo é conhecido como filtração.

Quando existem partículas sólidas com dimensões adequadas, a obstrução dos poros é rápida e somente a fase líquida do fluido, o filtrado, invade a rocha.

O filtrado e a espessura do reboco são dois parâmetros medidos rotineiramente para definir o comportamento do fluido quanto à filtração [3]. O filtrado API (*American Petroleum Institute*) é medido a temperatura ambiente e a uma pressão de 100 psi [4].

De modo geral, aditivos são incorporados aos fluidos de perfuração com o objetivo de melhorar o seu desempenho no poço. Dentre esses, encontram-se os antiespumantes, viscosificantes, redutores de filtrado, controladores de pH, inibidores de hidratação de argila, lubrificantes, bactericidas e selantes [1].

Durante a perfuração, é comum a presença de camadas constituídas por minerais argilosos. Muitas dessas argilas são facilmente hidratáveis como, por exemplo, as esmectitas. Essas possuem ligações intercrystalinas relativamente fracas, permitindo a entrada de água ou de outras substâncias polares, o que resulta no acréscimo da distância interplanar ou basal. Esse fenômeno é conhecido por expansão ou inchamento [5]. Este efeito constitui um grande problema durante a perfuração dos poços, porque diversos tipos de rocha contêm um índice elevado de argilas esmectíticas hidrofílicas, e os fluidos mais frequentemente usados são à base de água, devido suas vantagens econômicas e ambientais [6].

A sensibilidade à hidratação que tais formações possuem pode ocasionar drásticos danos, como: prisão de ferramentas, encerramento de brocas, desmoronamento das paredes do poço, baixa eficiência na remoção de sólidos, obstrução do espaço anular, etc. Esses problemas podem ser evitados com a escolha adequada do tipo de fluido, assim como o seu melhor dimensionamento.

Durante muitos anos foram utilizados fluidos à base de óleo, contudo, em virtude dos impactos ambientais sua utilização tem se tornado cada vez mais restrita. Assim, os fluidos de base aquosa, considerados menos agressivos ao meio ambiente e de menor custo, surgem como alternativa e, neste caso, os fluidos devem conter aditivos conhecidos como inibidores. Contudo, a maioria desses aditivos químicos são sais com presença de cloro nas suas composições.

Hoje, em virtude das regulamentações propostas pelas agências de proteção ambiental, a aplicação destes inibidores tem sido amplamente discutida e o desafio é obter novos produtos, isentos de cloro, com a mesma eficácia dos sais do tipo cloreto. Sendo assim, o uso do sulfato de potássio surge como uma alternativa ambientalmente correta para o uso em formulações de fluidos inibidos.

Diante do exposto, este trabalho objetiva estudar a influência de viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante e selante no comportamento reológico e de filtração de fluidos inibidos com sulfato de potássio.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Para a preparação dos fluidos de perfuração foram estudados os seguintes aditivos: antiespumante (líquido à base de silicone), viscosificante (goma xantana na forma de pó), redutor de filtrado (carboximetilcelulose de baixa densidade), controlador de pH (MgO em pó), inibidor de argila expansiva (sulfato de potássio), bactericida (solução de sulfato de (tetrakis)hidroximetilfosfônio), lubrificante (óleo vegetal de alta lubrificidade tratado quimicamente com ácidos e neutralizantes alcalinos) e selante (calcita). Para preparação do Fluido Padrão (FP) foram utilizados os inibidores KCl e K₂CO₃.

2.2. Métodos

2.2.1 Planejamento fatorial

Para avaliar a influência das variáveis de entrada (viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante e selante) sobre as propriedades reológicas (viscosidades aparente e plástica) e de filtração (volume de filtrado) de fluidos de perfuração aquosos inibidos com sulfato de potássio, foi utilizado um planejamento fatorial do tipo 2⁴ com três experimentos no ponto central, totalizando 19 experimentos.

A matriz de planejamento experimental fatorial utilizada está representada na Tabela 1.

Os valores codificados e reais das variáveis de entrada, empregados no planejamento, encontram-se na Tabela 2.

A regressão dos dados experimentais foi realizada utilizando o programa STATISTICA™ (STATSOFT) [7].

2.2.2 Preparação dos fluidos de perfuração

Foram desenvolvidos fluidos de perfuração à base de água, com baixo teor de sólidos, compostos pelos aditivos citados no item 2.1.

Os fluidos de perfuração foram preparados de acordo com a prática de campo, que consiste em adicionar os aditivos, um a um, sob agitação a uma velocidade constante de 13.000 rpm em agitador *Hamilton Beach*, modelo 936, obedecendo a ordem descrita na Tabela 3 permanecendo 5 min sob agitação a cada acréscimo de aditivo, com exceção do viscosificante, do redutor de filtrado e do selante, que permaneceram 10 min sob agitação.

Os aditivos e faixas de concentrações utilizados no desenvolvimento das formulações encontram-se apresentados na Tabela 3.

O fluido padrão (FP) utilizado foi obtido por Farias (2009), fazendo uso de aditivos utilizados pela PETROBRAS. Esse FP tem como aditivo de controle de inchamento uma mistura de inibidores que apresentam cloro em sua composição.

Tabela 1: Matriz de planejamento fatorial 2⁴, com três repetições no ponto central

Fluidos	Viscosificante (V)	Redutor de Filtrado (R)	Lubrificante (L)	Selante (S)
F1	-1	-1	-1	-1
F2	+1	-1	-1	-1
F3	-1	+1	-1	-1
F4	+1	+1	-1	-1
F5	-1	-1	+1	-1
F6	+1	-1	+1	-1
F7	-1	+1	+1	-1
F8	+1	+1	+1	-1
F9	-1	-1	-1	+1
F10	+1	-1	-1	+1
F11	-1	+1	-1	+1
F12	+1	+1	-1	+1
F13	-1	-1	+1	+1
F14	+1	-1	+1	+1
F15	-1	+1	+1	+1
F16	+1	+1	+1	+1
F17	0	0	0	0
F18	0	0	0	0
F19	0	0	0	0

Tabela 2: Níveis codificados e reais das variáveis de entrada do planejamento experimental 2⁴ com três experimentais no ponto central

Variáveis de entrada	Código	Níveis codificados		
		-1	0	+1
Viscosificante (g/350 mL)	V	0,75	1,125	1,5
Redutor de Filtrado (g/350 mL)	R	2,5	3,0	3,5
Lubrificante (%)	L	1,0	2,0	3,0
Selante (g/350 mL)	S	15,0	20,0	25,0

2.2.3. Estudo reológico dos fluidos de perfuração

Após repouso de 24h, foi realizado o estudo reológico dos fluidos de perfuração.

Para isso, o fluido foi agitado durante 5min em agitador mecânico *Hamilton Beach*, modelo 936, na velocidade de 17.000 rpm. Após a agitação, o fluido foi transferido para o recipiente do viscosímetro Fann modelo 35A. O viscosímetro foi acionado na velocidade de 600 rpm durante 2 min e efetuada a leitura. Logo após, a velocidade foi mudada para 300 rpm, efetuando a leitura após 15 s.

Com os dados das leituras obtidas no viscosímetro, foram calculadas as viscosidades aparente (VA) e plástica (VP), segundo a norma da PETROBRAS N-2605 [9].

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

Tabela 3: Aditivos e concentrações utilizados nas formulações dos fluidos de perfuração

Aditivos	Unidades	Faixa de concentração
(1) Anti-espumante	gotas*	6
(2) Viscosificante	g/350mL*	0,75 a 1,5
(3) Redutor de filtrado	g/350mL*	2,5 a 3,5
(4) Controlador de Ph	g/350mL*	1,0
(5) Inibidor de argila	g/350mL*	16,0
(6) Bactericida	g*	0,7
(7) Lubrificante	g/350mL*	1,0 a 3,0
(8) Selante	g/350mL*	15,0 a 25,0

2.2.4. Volume de filtrado

Para determinação do volume de filtrado, os fluidos foram agitados durante 1 min, em agitador mecânico *Hamilton Beach*, modelo 936, na velocidade de 17.000 rpm, após as 24h de repouso. Em seguida, o fluido foi transferido para o recipiente do filtro-prensa API, com aplicação de uma pressão da ordem de 7,0 kgf/cm² (100psi). Após 30 min, o filtrado foi lido e obteve-se a medida do volume do filtrado, expresso em mL.

3. Resultados e Discussão

Utilizando a ferramenta de planejamento experimental e análise de superfície de resposta é possível investigar a influência de determinadas variáveis em um processo e a sua forma de interação, bem como obter o valor das variáveis que maximizem os resultados esperados.

As propriedades reológicas (VA e VP) e de filtração (VF), obtidas com os fluidos estudados, estão apresentadas na Tabela 4.

Na Tabela 4 também constam os valores médios dos resultados de fluidos padrões (FP) [8].

O FP apresentou grande variação nas propriedades reológicas; tal fato se deve provavelmente à variação das concentrações dos aditivos nas formulações estudadas.

Foram observadas significativas variações nos valores das propriedades reológicas e de filtração dos fluidos. O fluido F16 possui em sua composição os maiores teores para todos os aditivos avaliados (viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante e selante) e apresentou os maiores valores de VA e VP e os menores valores de VF. Esses resultados comprovam que o aumento na concentração dos aditivos conduz ao aumento dos valores das propriedades reológicas e redução nos parâmetros de filtração.

Os valores de VA variaram de 39,0 cP para o fluido F5 a 67,0 cP para o fluido F16, que apresentam em suas formulações as menores e as maiores concentrações de viscosificante e redutor de filtrado, respectivamente. As propriedades avaliadas VP e VF também seguiram a mesma tendência observada para a VA, ou seja, apresentaram aumento em seus valores com o aumento da concentração do viscosificante e do redutor de filtrado.

Tabela 4: Propriedades reológicas (VA e VP) e de filtração (VF) dos fluidos preparados com sulfato de potássio

Fluidos	VA (cP)	VP (cP)	VF (mL)
F1	49,0	24,0	8,4
F2	53,5	26,0	7,8
F3	42,5	25,0	9,8
F4	55,0	29,0	8,0
F5	39,0	28,5	9,2
F6	48,0	23,5	8,2
F7	51,0	27,0	7,7
F8	58,5	30,0	6,4
F9	53,5	28,5	6,8
F10	59,0	28,5	6,6
F11	54,0	31,0	7,4
F12	60,5	30,0	7,2
F13	51,5	27,5	7,6
F14	50,0	24,0	8,8
F15	49,5	29,0	7,6
F16	67,0	35,0	6,6
F17	54,0	27,5	7,6
F18	58,5	29,0	7,6
F19	56,0	29,5	7,8
FP	44,5-60,0	23,5-35,0	6,0-7,6

Em relação aos valores de VF, foi observado que os fluidos F1, F2, F3, F4, F5, F6 e F7 apresentaram resultados superiores ao do fluido padrão. Todos estes fluidos apresentam a menor concentração de selante e esse comportamento comprova a efetiva ação deste aditivo na

redução das perdas por filtração, uma vez que o mesmo auxilia na formação do reboco, ou seja, o aumento da sua concentração implica numa diminuição do filtrado.

A Tabela 5 apresenta as análises de variância e os modelos matemáticos codificados (equação de regressão) para as propriedades reológicas (VA, VP) e para o volume de filtrado (VF) dos fluidos de perfuração estudados.

O coeficiente de determinação ou explicação (R^2) quantifica a qualidade do ajustamento, pois fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas, variando de 0 a 100% [10].

O teste F apresenta a razão entre o $F_{calculado}$ e o $F_{tabelado}$; sempre que esta relação for maior que 1, a regressão é estatisticamente significativa, ou seja, há relação entre as variáveis independentes e dependentes [10].

Nos casos estudados, a análise de significância estatística mostrou que os coeficientes de correlação (R) e os coeficientes de variação explicada dos resultados experimentais para VA, VP e VF dos fluidos preparados de acordo com o planejamento apresentado foram satisfatórios, superiores a 0,98 e 97,0%, respectivamente. Deste modo, pode-se dizer que os modelos apresentados na Tabela 5 têm mais de 97,0% das variações obtidas explicadas pelo modelo.

Na Tabela 5 também podem ser observados os valores de Teste F. Todos os parâmetros avaliados apresentaram valores de Teste F superiores a 1, indicando que os modelos são estatisticamente significativos ao nível de 95,0% de confiança.

Tabela 5: Análise de variância (ANOVA) da VA, VP e VF dos fluidos preparados com planejamento fatorial.

Fonte de variação	Níveis codificados		
	VA (cP)	VP (cP)	VF (mL)
Coefficiente de correlação (R)	0,989	0,988	0,996
% de variação explicada	97,93	97,79	99,29
$F_{calculado}/F_{tabelado}$	1,10	1,10	3,14

Modelos matemáticos codificados para os fluidos preparados com sulfato de potássio

$$VA (cP) = 52,34* + 2,41*V + 2,91*R - 1,53L + 2,28*S - 0,78VR + 2,66*VL + 2,09*VS + 2,78*RL + 0,22RS - 0,59LS + 1,97VRL + 2,28VRS - 1,16*VLS - 0,16RLS$$

$$VP (cP) = 27,87* + 0,31*V + 1,63*R + 0,125L + 1,31*S + 1,18*VR - 0,31VL - 0,13*VS + 0,63RL + 0,44*RS - 0,44LS + 1,06*VRL - 0,13VRS + 0,75VLS + 0,44RLS$$

$$VF (mL) = 7,76* - 0,18*V - 0,17*R + 0,006L - 0,43*S - 0,11VR + 0,17*VL + 0,41*VS - 0,52*RL + 0,044RS + 0,32*LS + 0,044VRL + 0,081VRS + 0,16*VLS + 0,094RLS$$

*estatisticamente significativa com 95,0% de confiabilidade

Porém, para nenhuma das propriedades foi obtido um modelo preditivo, uma vez que as razões entre o teste $F_{calculado}$ e o teste $F_{tabelado}$ apresentaram valores inferiores a 5 [11].

Pode-se observar que as propriedades apresentadas pelos fluidos formulados foram condizentes com o padrão, ou seja, que os fluidos preparados com o KCl, como inibidor de expansão, apresentaram propriedades reológicas e de filtração semelhantes aos fluidos preparados com o sulfato de potássio como inibidor. Este comportamento pode indicar que a

natureza do inibidor não influencia diretamente nas propriedades reológicas e de filtração dos fluidos.

Com a análise dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 5 observa-se que o aumento da concentração do redutor de filtrado influencia as propriedades de VA, VP e VF de modo estatisticamente significativo. A partir desta observação, tal variável de entrada foi fixada no nível +1 (3,5 g/ 350 mL de água).

Em todas as equações de regressão obtidas para os modelos, percebe-se a forte influência do viscosificante, do redutor de filtrado e do selante sobre as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos.

A partir da análise das superfícies de respostas, pode-se observar a influência da concentração de cada aditivo sobre as propriedades analisadas.

As Figuras 1 e 2 apresentam as superfícies de resposta das interações estatisticamente significativas, utilizando-se dos modelos matemáticos codificados apresentados na Tabela 5, para as propriedades VA, VP e VF, respectivamente, fixando-se a variável redutor de filtrado no nível +1 (3,5 g) pois, o aumento da concentração desta variável interfere de forma estatisticamente significativa nas propriedades citadas.

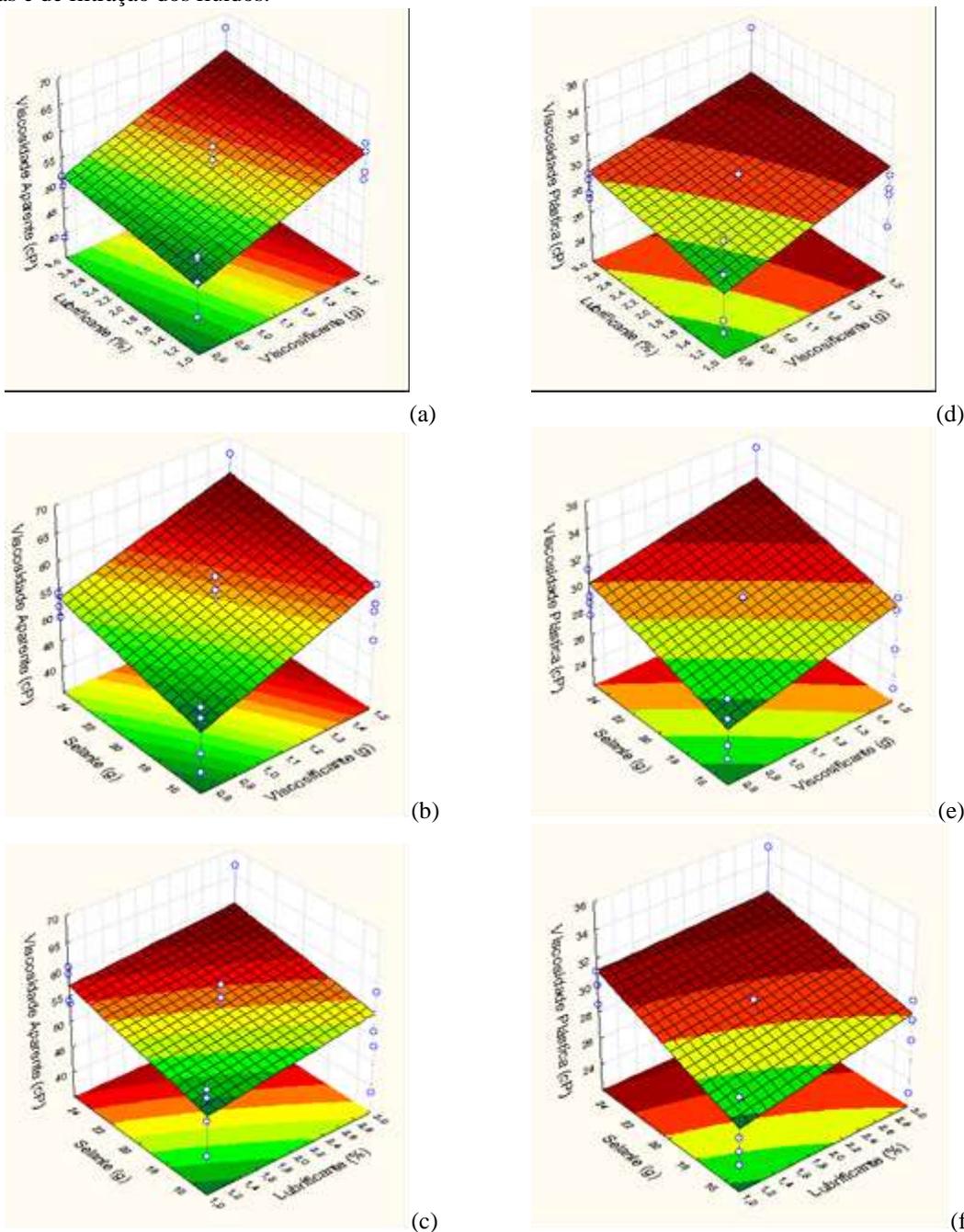


Figura 1: Superfícies de resposta para a viscosidade aparente- (a), (b) e (c) e viscosidade plástica (d), (e) e (f), fixando-se o redutor de filtrado em 3,5 g/ 350 mL de água (+1)

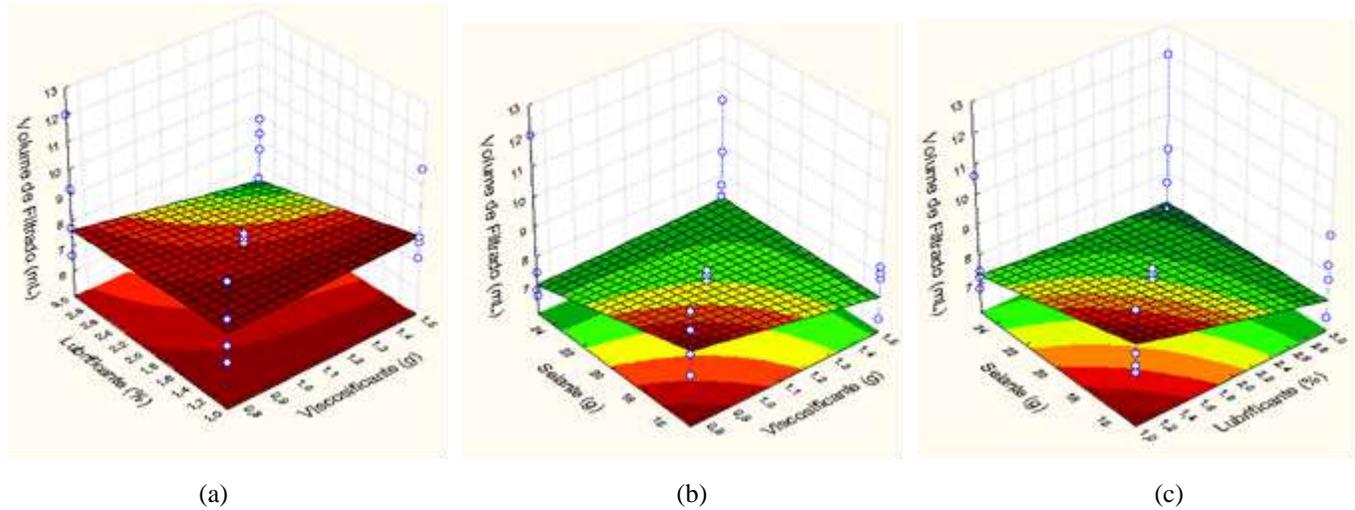


Figura 2: Superfícies de resposta para o volume de filtrado, fixando-se o redutor de filtrado em 3,5 g/ 350 mL de água (+1)

A Figura 1 (a) e (d) apresenta as superfícies de resposta para a viscosidade plástica e aparente, respectivamente com o redutor de filtrado fixo na concentração máxima e o selante na concentração central.

A Figura 1 (b) e (e) apresenta as superfícies de resposta para a viscosidade plástica e aparente, com o redutor de filtrado fixo na concentração máxima e o lubrificante no nível 0. Já a Figura 1 (c) e (f) apresenta as superfícies de resposta para a viscosidade plástica e aparente, com o redutor de filtrado fixo na concentração máxima e o viscosificante fixo no ponto central.

Observou-se que as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos estudados são influenciadas pelo teor dos aditivos, interferindo de forma estatisticamente significativa nas viscosidades aparente e plástica e no volume de filtrado, ao nível de 95,0% de confiança, sendo obtidos maiores valores de VA e VP e menores valores de VF quando há um aumento nas concentrações dos aditivos avaliados. Deste modo, as superfícies de resposta representam graficamente o modelo obtido, indicando que as alterações dos níveis das variáveis independentes (aditivos), apontadas como estatisticamente significativas pelo modelo, promovem visíveis alterações nos valores de tais propriedades.

A viscosidade plástica é descrita como a resistência ao atrito entre as partículas dispersas e as moléculas do líquido dispersante [12]. Desta forma, o aumento na concentração de sólidos, como o selante, conduz a maiores valores de VP.

Os valores de viscosidade aparente (VA) e plástica (VP) variaram com a concentração dos aditivos, como pode ser observado na Figura 1 (d), na qual as maiores concentrações dos aditivos apresentaram maior valor de VP. Esse comportamento em relação às concentrações de aditivos é esperado e decorrente, por exemplo, da ação do viscosificante, que é um aditivo que tem como principal função conferir viscosidade ao fluido.

O aumento no teor de redutor de filtrado promoveu em geral, além da redução no volume de filtrado, aumento significativo nos valores das propriedades reológicas. Esse 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, segundo o fabricante, foi produzido com uma celulose de tamanho de cadeia maior que o da celulose tradicionalmente utilizada no preparo destes aditivos. Em maiores concentrações, como a de 1 %, o aditivo passa a agir como viscosificante, justificando os altos valores observados das propriedades reológicas [13].

Os valores de VF apresentaram uma pequena redução com o aumento da concentração do selante (calcita). Esse comportamento também está de acordo com o esperado, visto que este aditivo tem como função auxiliar na redução das perdas por filtração. Essa redução foi observada nos fluidos F1 e F9, que apresentaram valores de VF de 8,4 e 6,8 mL, respectivamente. Esses fluidos possuem a mesma concentração de viscosificante, de redutor de filtrado e de lubrificante, diferindo apenas na concentração de selante.

A Figura 2 (c) apresenta a superfície de resposta para o volume de filtrado e mostra a interação do lubrificante com o selante, com o redutor de filtrado fixo na concentração máxima e o viscosificante na concentração central. Neste caso, observa-se que o menor valor para o volume de filtrado é obtido quando se utiliza a maior fração mássica de selante e de lubrificante. Esse melhor resultado nos parâmetros reológicos pode se dever ao fato de que o lubrificante pode vir a formar um filme sobre a superfície capaz de interações mais fortes que os óleos comuns, levando a redução dos valores de VF com o aumento da concentração de lubrificante. Esse comportamento pode ser provavelmente explicado, pelo fato do lubrificante ser hidrofóbico e quando em combinação (formando filme) com selante diminui a permeabilidade da água no reboco.

4. Conclusões

Após utilizar o planejamento experimental para estudar a influência do viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante e selante no comportamento reológico e de filtração de fluidos inibidos com sulfato de potássio (para um menor dano ambiental), conclui-se que:

- o fluido F16 apresentou o melhor desempenho, muito provavelmente, em virtude da maior concentração de aditivos utilizada na composição estabelecida pelo planejamento experimental;
- o redutor de filtrado, o viscosificante e o selante são variáveis independentes estatisticamente significativas ao nível de 95,0 % de confiança para todas as propriedades analisadas;
- o aumento da concentração do redutor de filtrado aumenta significativamente os valores de viscosidade plástica, pois, para concentrações mais elevadas o mesmo age como viscosificante;
- os valores de volume de filtrado para as formulações com o menor teor de selante, ainda estão acima dos valores apresentados pelo fluido padrão.
- a análise das superfícies de resposta dos fluidos apontou que quanto maior a concentração de aditivos nos fluidos maiores são os valores de VA e VP e menores os valores de VF.

Referências

- [1] LUMMUS, J.L E AZAR, J.J., *Drillings Fluids Optimization A Pratical Field Approach*, PennWell Publishing Company, Tulsa, Oklahoma, 1986.
- [2] THOMAS J.E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. Rio de Janeiro: PETROBRAS, 2001.
- [3] VITAL, G. S., *Seleção de tensoativos e influência de um estabilizante para a otimização de formulações de fluidos de perfuração à base de óleo vegetal*, Monografia de fim de Curso. Natal: UFRN, 2005. 50p.
- [4] VIDAL, E. L. F., *Avaliação da resistência térmica de fluidos de perfuração à base de óleo vegetal*, Monografia de fim de Curso. Natal: UFRN, 2006.
- [5] GUIMARÃES, I. B., ROSSI, L. F. S., *Estudo dos constituintes dos fluidos de perfuração: proposta de uma formulação otimizada e ambientalmente correta*, 4º *PDPETRO*, Campinas, SP, 2007.
- [6] AMORIM, L.V. *et al.* Estudo Comparativo entre Variedades de argilas bentoníticas de Boa Vista, Paraíba. *Revista Matéria*, v 11, 2006. P 30-40.
- [7] STATSOFT, Inc. *STATISTICA for Windows*, version 5.0, 2000, 1 CD.
- [8] FARIAS, K. V. *et al.* Desenvolvimento de fluidos aquosos para aplicação em perfuração de poços de petróleo – Parte I, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.4.1, 2009.
- [9] PETROBRAS, *Ensaio de viscosificante para fluido de perfuração base de água na exploração e produção de petróleo, Método*, N-2605, 1998.
- [10] RODRIGUES, M.I.; IEMA, A.F., PETROBRAS, *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos*, Campinas, Cárita Editora, 2010.
- [11] BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E., *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas, SP, Editora da Unicamp, 1996.
- [12] MACHADO, J.C.V, et AL, PETROBRAS, *Argilominerais e as formações argilosas*, 1995.