

EFEITOS DE ADITIVOS POLIMÉRICOS NAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E DE FILTRAÇÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Danielly Vieira de Lucena¹

Hélio de Lucena Lira²

Luciana Viana Amorim³

Resumo

A influência da carboximetilcelulose, CMC, (redutor de filtrado) e da goma xantana (viscosificante), nas viscosidades aparente e plástica, no limite de escoamento e no volume de filtrado na composição de fluidos de perfuração à base de água foi investigada com base no delineamento estatístico. Cinco formulações compostas por uma faixa de concentração utilizada comercialmente foram utilizadas na concepção da experiência. As formulações foram preparadas de acordo com os padrões da empresa Petrobras. Foram calculados modelos de regressão, correlacionando as propriedades com as composições. A importância e a validação dos modelos foram confirmadas pela análise estatística. O desenho estatístico pode ser aplicado para otimizar as propriedades da lama considerando adição de CMC e da goma xantana, e para obter um melhor entendimento sobre a influência de aditivos sobre as propriedades de polímeros de sistemas de fluidos de base água. A partir do estudo observou-se que os valores das propriedades reológicas 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.

Palavras-chaves: Fluidos poliméricos; Viscosificante; Redutor de filtrado; Delineamento estatístico.

EFFECTS OF PROPERTIES POLYMERIC ADDITIVES IN RHEOLOGIC AND DRILLING FLUIDS

Abstract

The influence of carboxymethylcellulose, CMC (filtrate reducer) and xanthan gum (viscosifier) in plastic and apparent viscosity at yield strength and the volume of filtrate in the composition of drilling fluids based on water was investigated based on statistical design. Five formulations consist of a range of concentrations used commercially were utilized in the design of the experiment. The formulations were prepared in accordance with company standards Petrobras. Regression models were calculated and correlated with the properties of the compositions. The relevance and validation of the models were confirmed by statistical analysis. The design can be applied to statistically optimize the mud properties considering the addition of CMC and xanthan gum, and to provide a better understanding of the influence of additives on the properties of polymer-based fluid system water. From the study it was observed that the values of the rheological properties vary with the concentration of additives, increasing with increasing concentration of the same, and that the concentration of the additives caused a decline of parameter values filtration.

Keywords: Polymeric fluids; Viscosifier; Filtrate reducer; Statistical design.

I INTRODUÇÃO

A incorporação de polímeros como componentes de fluidos de perfuração figura atualmente como uma das principais alternativas para adequação das propriedades que o fluido deve apresentar na atividade de perfuração de poços de petróleo [1].

Os fluidos de perfuração apresentam várias propriedades físico-químicas que devem ser levadas em consideração durante sua aplicação [2]. As soluções poliméricas colocam-se como alternativa para contornar alguns desafios impostos pelo processo de exploração

¹Doutoranda em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

E-mail: daniellymateriais@yahoo.com.br

²Professor Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

E-mail: helio@dema.ufcg.edu.br

³Professora Doutora, Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB, Brasil.

E-mail: luciana@dem.ufcg.edu.br

do petróleo, mais notadamente as etapas de perfuração do poço [3,4]. Segundo Rossi [5] polímeros são utilizados em fluidos de perfuração aquosos para reduzir a filtração, floculação de sólidos perfurados, aumento de viscosidade. Em alguns casos, um polímero particular pode satisfazer várias funções. Mas geralmente uma combinação de polímeros é adicionada para atender aos requisitos acima.

Na composição de fluidos de perfuração são empregados comumente aditivos com o objetivo de melhorar ou controlar suas propriedades reológicas e de filtração. Dentre os aditivos mais comuns e rotineiramente utilizados em fluidos como viscosificante e redutor de filtrado, destaca-se o carboximetilcelulose (CMC) polímero aniônico, natural modificado derivado da celulose. O uso de tal aditivo reduz as perdas por filtração e produz rebocos muito finos e capazes de impedir o escoamento do fluido através das formações geológicas que estão sendo perfuradas além de manter as propriedades de fluxo adequadas mesmo em condições de alta temperatura, alta salinidade e alta pressão [6-11].

As propriedades físico-químicas do CMC dependem do grau de substituição (DS), grau de polimerização (DP), uniformidade da substituição e pureza do produto. O DP é definido como o número médio de unidades monoméricas ao longo da cadeia polimérica; quanto maior DP, maiores o peso molecular e a viscosidade do polímero. O DS refere-se a, dentre as estruturas de repetição ao número de substituições que ocorre em média de alguns de seus radicais, resultando em um polímero modificado. Os produtos industrialmente importantes apresentam graus médios de substituição inseridos em uma faixa relativamente restrita, entre 0,5 a 1,5, contudo seu valor pode atingir um máximo de 3,0. Nos últimos anos trabalhos foram desenvolvidos visando avaliar o efeito da adsorção de polímeros em argilas bentoníticas [12-14] a influência de polímeros de pequena cadeia molecular na reologia de dispersões de argilas bentoníticas [15], a correlação entre a estrutura e a eficiência de aditivos poliméricos para fluidos de perfuração [7,16] e a relação entre a composição, a estrutura [17].

Outro polímero bastante utilizado em fluidos de perfuração como já citado, é a goma xantana. Sua importância concerne no fato da mesma agir conferindo viscosidade ao fluido. Tal polímero se trata de um polisacarídeo produzido por espécies de bactérias do gênero *Xanthomonas* [18]. Sua produção, comercialização e utilização como espessante e estabilizante tornou-se crescente com o passar dos anos [19].

O amplo interesse em relação à goma xantana deve-se às suas propriedades físico-químicas, que superam todas as dos outros polissacarídeos disponíveis no mercado. Dentre estas propriedades destacam-se a sua capacidade de aumentar drasticamente a viscosidade do meio, mesmo que adicionadas em pequenas quantidades, bem como sua estabilidade em ampla faixa de temperatura e de pH, mesmo na presença de sais. A goma

xantana é também estável em ampla faixa de temperatura (10°C a 90°C) [20-22].

A influência de aditivos e de suas interações nas propriedades reológicas e de filtração têm sido alvo de importantes estudos no campo de fluidos de perfuração para a indústria petrolífera. No entanto, os estudos realizados até agora não apresentaram um método no qual se pode observar um modelo de otimização para concentração dos aditivos utilizados. Métodos de projeto estatísticos são técnicas rigorosas que utilizadas para alcançar as propriedades desejadas assim como para estabelecer uma composição otimizada, minimizando o número de experimentos [23,24].

No desenvolvimento de lamas de perfuração, o processamento e/ou as condições de ensaio são mantidos constantes, e uma série de propriedades reológicas são determinadas de acordo com a combinação (ou mistura), de matérias-primas. A partir do conhecimento da usual mistura de componentes para formulação de fluidos de perfuração justifica-se o uso da estatística a partir de delineamento de experimentos com mistura de componentes para obter uma superfície de resposta que facilitam a análise dos resultados de cada uma das propriedades avaliadas utilizando matemática e técnicas estatísticas [25,26]. Para este fim, é necessário em primeiro lugar selecionar as misturas apropriadas a partir da qual da superfície de resposta pode ser obtida. A partir da superfície de resposta uma previsão do valor da propriedade em análise pode ser obtida por qualquer mistura, com base em mudanças nas proporções dos seus componentes [27]. Esta metodologia tem encontrado aplicações importantes em diversas áreas tecnológicas [14,28,29]. Em todos os casos relatados, a metodologia tem levado a uma maior eficiência e confiança nos resultados obtidos e otimizou simultaneamente os sistemas com um mínimo de experimentos.

Assim, este trabalho objetiva estudar a influência da concentração de viscosificante (goma xantana) e do redutor de filtrado (carboximetilcelulose) no comportamento reológico e de filtração de fluidos de perfuração poliméricos utilizando como ferramenta o planejamento experimental.

2 MATERIAIS

Para a preparação dos fluidos de perfuração, serão utilizados os seguintes aditivos: viscosificante (goma xantana), redutor de filtrado (carboximetilcelulose de baixa viscosidade apresentando cadeia longa, grau de substituição de 0,75 e com peso molecular de cerca de 200.000 g/mol), anti-espumante (líquido à base de silicone), bactericida (solução de (tetraquis)hidroximetilfosfônio), selante (calcita), lubrificante (óleo vegetal de alta lubrificidade tratado quimicamente com ácidos e neutralizantes alcalinos), controlador de pH (MgO) e inibidores de expansão (sulfato de potássio).

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

Aditivos	Nome comercial	Unidades	Faixa de concentração
Anti-espumante	SM-Foam	gotas	6
Viscosificante (goma xantana)	Goma Gel	g/350mL*	0,75 a 1,5
Redutor de filtrado (carboximetilcelulose)	Celutrol ADS	g/350mL*	2,5 a 3,5
Controlador de pH	MgO	g/350mL*	1,0
Inibidor de inchamento	SM Hib	g/350mL*	16,0
Bactericida	SM- Bac Green	g*	0,7
Lubrificante	SM Bio Lub	g/350mL*	3
Selante	Calcita	g/350mL*	15,0

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

As amostras dos aditivos foram fornecidas pela Empresa System Mud Indústria e Comércio Ltda.

Os aditivos acima citados são apresentados na Tabela 1.

3 METODOLOGIA

3.1 Planejamento Fatorial

Para avaliar a influência das variáveis de entrada (viscosificante e redutor de filtrado) sobre as propriedades reológicas (viscosidades aparente e plástica, e limite de escoamento) e de filtração (volume de filtrado) de fluidos de perfuração, foi utilizado um planejamento fatorial do tipo 2² com três experimentos no ponto central, totalizando 7 experimentos, conforme recomendado por Rodrigues e Iema [30]. A matriz de planejamento experimental fatorial utilizada está representada na Tabela 2.

Os níveis das variáveis independentes utilizadas em ordem crescente (-1, 0, +1) foram: 0,75, 1,125 e 1,5 gramas para o viscosificante (V), e 2,5, 3,0 e 3,5 gramas para o redutor de filtrador de filtrado (R).

A regressão dos dados experimentais foi realizada utilizando o programa Statistica™ (Statsoft) [31].

O coeficiente de determinação ou explicação (R²) 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% [30].

O teste F é utilizado para comparar variâncias. Ele é, em geral, o quociente entre os quadrados médios de tratamentos e resíduo. Esse quociente tem uma distribuição F com n1 = graus de liberdade do tratamento e n2 = graus de liberdade do resíduo. Após calculado o valor de F, compara-se com o valor de F tabelado para algum nível de significância desejado [30].

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 [32].

Tabela 2. Matriz de planejamento fatorial 2², com três repetições no ponto central

Fluidos	Viscosificante (V)	Redutor de Filtrado (R)
F1	-1	-1
F2	+1	-1
F3	-1	+1
F4	+1	+1
F5	0	0
F6	0	0
F7	0	0

3.2 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 a uma velocidade constante de 13.000 rpm em agitador *Hamilton Beach*, modelo 936, obedecendo a ordem descrita na Tabela 1.

Os aditivos e as faixas de concentrações que foram utilizados no desenvolvimento das formulações dos fluidos inibidos também se encontram apresentados na Tabela 1. A análise química das argilas por fluorescência de raios-X (FRX) foi realizada pelo método semiquantitativo, sob atmosfera de nitrogênio. O equipamento utilizado foi o modelo EDX-720 marca Shimadzu pertencente ao Laboratório de Caracterização de Engenharia de Materiais/CCT/UFCG.

3.3 Estudo Reológico dos Fluidos de Perfuração

Após repouso de 24 horas, foi realizado o estudo reológico dos fluidos de perfuração a temperatura ambiente. Para isso, o fluido foi agitado durante 5 minutos 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 minutos e efetuada a leitura. Logo após, a velocidade foi mudada para 300 rpm, efetuando a leitura após 15 segundos.

Com os dados das leituras obtidas no viscosímetro, foram calculadas as viscosidades aparente (VA) e plástica

(VP) e o limite de escoamento (LE) segundo a norma da Petrobras EP-IEP-00011-A [33].

3.4 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. 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 minutos, o filtrado foi lido e obteve-se a medida do volume do filtrado, expresso em mL.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta as análises de variância e os modelos matemáticos codificados para as propriedades reológicas (VA, VP e LE) e para o volume de filtrado (VF) dos fluidos de perfuração estudados.

Realizando-se a análise do planejamento experimental e dos diagramas dele extraídos para os fluidos preparados, constatou-se que a variável viscosificante (V) é estatisticamente significativa para todas as propriedades reológicas analisadas, comprovando sua atuação como modificador reológico na composição de fluidos de perfuração como apresentado na Tabela 3, ao nível de 95% de confiança.

Através dos resultados do planejamento é possível determinar os coeficientes de regressão (Tabela 3) para as quatro respostas de interesse e assim realizar análises e construir as superfícies de resposta.

Pela análise da Anova, apresentada na Tabela 3, observou-se que os modelos descrevem as respostas VA, VP, LE e VF em função das variáveis estudadas, com parâmetros estatisticamente significativos. A porcentagem de variação explicada para os fluidos preparados é de 92,89%, 95,42%, 94,17% e 94,79% para as respostas VA, VP, LE e VF, respectivamente. É importante destacar que nos parâmetros do modelos descritos temos que a variável

viscosificante é representada por V, a variável redutor de filtrado é representada por R e a representação VR está relacionada com a influência da interação do viscosificante e o redutor de filtrado.

Ainda de acordo com a análise da Tabela 3, observou-se que os modelos matemáticos obtidos a partir dos dados experimentais obtidos para todas as variáveis de resposta analisadas (VA, VP, LE e VF) são estatisticamente significativos, pois a razão entre o teste $F_{\text{calculado}}$ e o teste F_{tabelado} foi superior a 1.

Observou-se a influência das variáveis independentes dos fluidos de perfuração sobre as propriedades reológicas e de filtração por meio da análise das superfícies de respostas obtidas para cada um desses parâmetros.

Significativas variações nos valores das propriedades reológicas e de filtração dos fluidos foram observadas em relação as diferentes concentrações dos aditivos poliméricos analisados. O fluido que possui em sua composição os maiores teores dos aditivos avaliados (viscosificante e redutor de filtrado) foi aquele que apresentou os maiores valores em relação às propriedades reológicas (VA, VP e LE).

A partir da análise dos gráficos contidos nas Figuras 1, 2 e 3 observou-se que ambos aditivos agem como modificadores reológicos, pois, o aumento na concentração dos aditivos para os fluidos preparados conduz ao aumento dos valores das propriedades reológicas, tal fato pode ser corroborado pelos modelos existente na Tabela 3, no qual indica a partir da condição positiva das variáveis V e R, que o aumento de ambos os aditivos promovem o aumento das viscosidades aparente e plástica e do limite de escoamento. Este 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, e do redutor de filtrado, composto por um polímero que também pode agir como viscosificante.

Nas Figuras 1, 2 e 3 pode-se observar as superfícies de resposta da viscosidade aparente, viscosidade plástica e limite de escoamento, respectivamente, e verificar a ação da goma xantana (viscosificante) e do CMC (redutor

Tabela 3. Análises de variância (Anova) e modelos matemáticos codificados das viscosidades aparente (VA) e plástica (VP), limite de escoamento (LE) e do volume de filtrado (VF) dos fluidos preparados com o inibidor acetato de potássio para o planejamento fatorial empregado

Fonte de variação	Variáveis de resposta			
	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	VF (mL)
Coefficiente de correlação (R)	0,936	0,976	0,970	0,973
% de variação explicada (R ²)	92,89	95,42	94,17	94,79
$F_{\text{calculado}} / F_{\text{tabelado}}$	1,54	2,26	1,99	1,96
Modelos matemáticos codificados				
	VA (cP) = 56,35* + 3,00*V + 0,50R + 0,25VR			
	VP (cP) = 29,43* + 0,50*V + 2,00*R - 0,50VR			
	LE = 54,72* + 16,00*V + 1,00R + 5,00VR			
	VF (mL) = 7,25* - 0,2*V - 1,00*R - 0,00VR			

*estatisticamente significativa com 95,0% de confiabilidade.

de filtrado) como modificadores reológicos a partir das combinações entre variáveis estatisticamente significativas, utilizando-se dos modelos matemáticos codificados apresentados na Tabela 3. Na Figura 4 pode-se observar a influência destas mesmas variáveis no comportamento do fluido em relação às perdas por filtração.

Os valores das propriedades reológicas de viscosidade aparente (VA) e plástica (VP) apresentaram significativa variação com a mudança da concentração dos aditivos. Esse comportamento em relação às concentra-

ções de aditivos é esperado e decorrente, como citado anteriormente da ação do viscosificante, que é um aditivo que tem como principal função conferir viscosidade ao fluido. Este resultado pode ser explicado pelo fato de que quando os aditivos poliméricos são adicionados aos fluidos, os mesmos são dispersos na fase líquida (água) e seus grupos funcionais se tornam mais ou menos dissociados, e a cadeia polimérica flexível assume uma configuração alongada. Esta configuração é responsável pelo aumento na viscosidade do sistema.

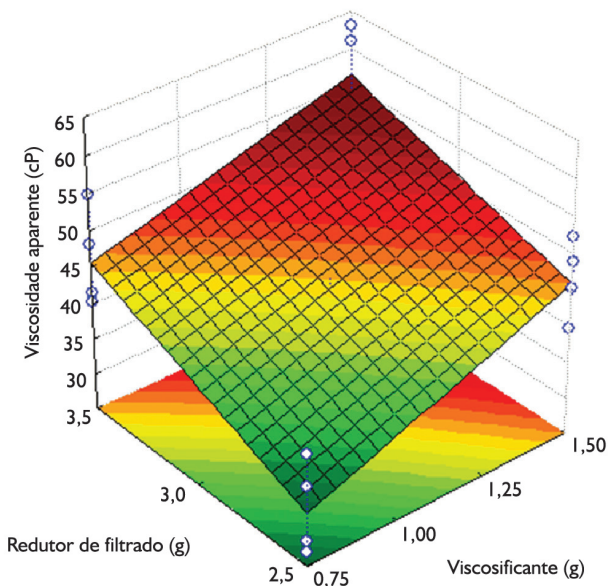


Figura 1. Superfícies de resposta para a viscosidade aparente (VA) a partir da interação entre os aditivos viscosificante e redutor de filtrado para os fluidos estudados.

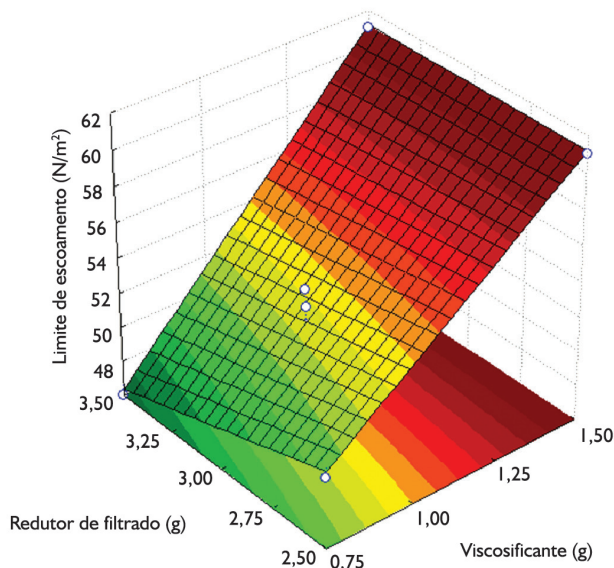


Figura 3. Superfícies de resposta para o limite de escoamento (LE) a partir da interação entre os aditivos viscosificante e redutor de filtrado para os fluidos estudados.

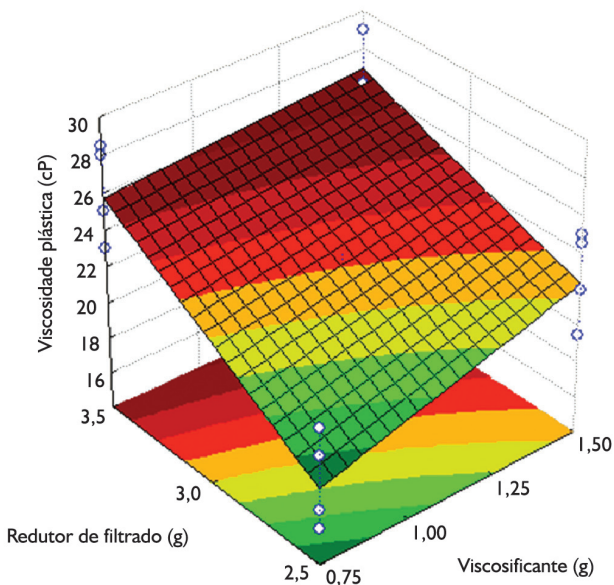


Figura 2. Superfícies de resposta para a viscosidade plástica (VP) a partir da interação entre os aditivos viscosificante e redutor de filtrado para os fluidos estudados.

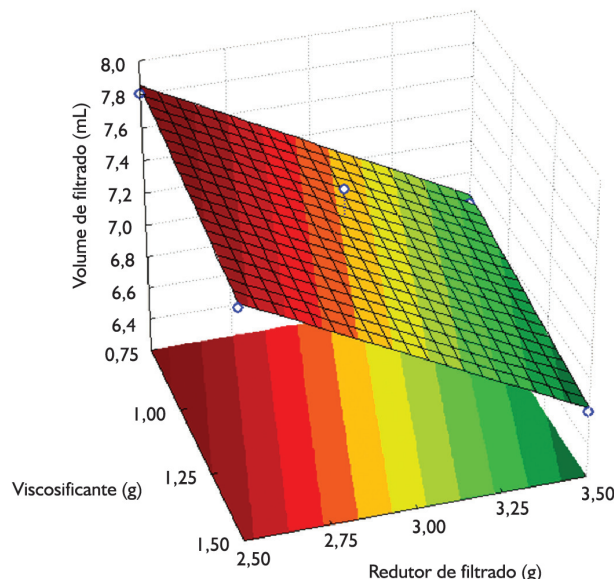


Figura 4. Superfícies de resposta para o volume de filtrado (VF) a partir da interação entre os aditivos viscosificante e redutor de filtrado para os fluidos estudados.

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 3,5 g/ 350 mL de água, o aditivo passa a agir como viscosificante, justificando os altos valores observados das propriedades reológicas [34]. Deste modo, pode-se afirmar que este comportamento de aumento dos valores da VA e VP se deve a efetiva atuação da goma xantana que é utilizada como viscosificante, aliada ação secundária do CMC como viscosificante.

A partir da análise da superfície de resposta obtida para o limite de escoamento (Figura 3) observa-se que esta propriedade segue a mesma tendência das demais propriedades reológicas, apresentando um aumento com o respectivo aumento da concentração dos aditivos analisados, ou seja, o viscosificante e o redutor de filtrado. O limite de escoamento se trata da força mínima necessária para que um fluido inicie seu escoamento, ou seja, a força necessária para romper as ligações eletrostáticas hidrofóbicas, e uma maior concentração de aditivos implica em uma maior quantidade de ligações a serem rompidas [35].

A Figura 4 apresenta a superfície de resposta para o volume de filtrado e mostra a interação do viscosificante e do redutor de filtrado. Neste caso, observa-se que o menor valor para o volume de filtrado é obtido quando se utiliza a maior fração mássica dos dois aditivos. Esse resultado evidencia que os polímeros atuam também nas perdas por filtração, bem como que a ação conjunta do viscosificante e do redutor de filtrado é bastante eficiente na redução do volume de filtrado a valores próximos de 6 mL, valor bastante expressivo e importante em fluidos de perfuração aquosos. Em relação aos valores de VF, foi observado que os fluidos com o maior teor de redutor de filtrado (F3 e F4) apresentaram os menores valores de volume de filtrado (6,8 e 6,6, respectivamente), ou seja,

o aumento da sua concentração implica numa diminuição desta propriedade.

5 CONCLUSÕES

Após utilizar o planejamento experimental para estudar a influência dos polímeros goma xantana e CMC como modificadores reológicos em fluidos de perfuração de poços de petróleo, conclui-se que:

- o viscosificante (goma xantana) se apresenta como uma variável independente estatisticamente significativa para todas as propriedades analisadas (VA, VP, LE e VF), ou seja, o aumento da sua concentração influencia positivamente as referidas propriedades, tendo seu estudo estatístico comprovado sua importância na influência destas propriedades;
- o fluido F4 apresentou o melhor desempenho, muito provavelmente, em virtude da maior concentração de aditivos utilizada na composição estabelecida pelo planejamento experimental;
- a análise das superfícies de resposta apontou que quanto maior a concentração de aditivos (viscosificante e redutor de filtrado) nos fluidos de perfuração maiores são os valores das propriedades reológicas (VA, VP e LE) e menores os valores de VF; e
- é possível afirmar por meio do estudo estatístico (modelos matemáticos obtidos e superfície de resposta) que os aditivos goma xantana (viscosificante) e CMC (redutor de filtrado) atuam como modificadores reológicos, alterando estas propriedades por meio da variação de suas concentrações.

Agradecimentos

A CAPES e ao CNPq (Processo N° 305729/2010-1) pelo apoio financeiro, à System Mud Indústria e Comércio Ltda. pelo fornecimento dos aditivos estudados e ao Laboratório de Pesquisa de Fluidos de Perfuração - PEFLAB do LABDES/ UFCG.

REFERÊNCIAS

- 1 Barbosa MIR. Bentonitas aditivadas com polímeros para aplicação em fluidos de perfuração [dissertação de mestrado]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2006.
- 2 Lucena DV, Leite RS, Amorim LV, Lira HL. Aplicação do planejamento experimental no estudo de fluidos inibidos isentos de cloro: Parte I. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. 2010;5(3):42-49.
- 3 Barbosa MIR, Amorim LV, Barboza KRA, Ferreira HC. Desenvolvimento de compósitos bentonita/polímeros para aplicação em fluidos de perfuração. Matéria. 2007;12(2):367-372.
- 4 Hamed SB, Belhadri M. Rheological properties of biopolymers drilling fluids. Journal of Petroleum Science and Engineering. 2009;67:84-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2009.04.001>

- 5 Rossi S, Luckham PF, Tadros TF. Influence of non-ionic polymers on the rheological behavior of Na–montmorillonite clay suspensions. Part II. Homopolymer ethyleneoxide and polypropylene oxide–polyethylene oxide ABA copolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2003;215(1-3):1-10. [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00446-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00446-6)
- 6 Caenn R, Chillingar GV. Drilling fluids: state of the art. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 1996;14:221-230. [http://dx.doi.org/10.1016/0920-4105\(95\)00051-8](http://dx.doi.org/10.1016/0920-4105(95)00051-8)
- 7 Hughes TL, Jones TGJ, Houwen OH. Chemical characterization of CMC and its relationship to drilling-mud rheology and fluids loss. *SPE Drilling & Completion*. 1993;8:157-163.
- 8 Pereira E. Fluido de perfuração PAC/CMC x Bentonita: Um confronto desigual. *System Mud*. 2000 [acesso em 8 jul. 2002]. Disponível em: www.systemmud.com.br.
- 9 Dolz M, Jiménez J, Jesús Hernández M, Delegido J, Casanovas A. Flow and thixotropy of non-contaminating oil drilling fluids formulated with bentonite and sodium carboxymethyl cellulose. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2007;57(3-4):294-302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2006.10.008>
- 10 Benchabane A, Bekkour K. Rheological properties of carboxymethyl cellulose (CMC) solutions. *Colloid and Polymer Science*. 2008;286(10):1173-80. <http://dx.doi.org/10.1007/s00396-008-1882-2>
- 11 Pereira E. Química dos polímeros e aplicações - Parte IV. *System Mud*. 2009 [acesso em 8 jul. 2002]. Disponível em: www.systemmud.com.br.
- 12 Lagaly G, Ziesmer S. Colloid chemistry of clay minerals: the coagulation of montmorillonite dispersion. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003;100:105-128. [http://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00064-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00064-7)
- 13 Sueyoshi KH. Propriedades coloidais e reológicas de suspensões de bentonita aditivadas com poliácridamida e cloreto de sódio [dissertação de mestrado]. Campinas: Universidade Estadual de Campinas; 1994. PMCID:PMC303070.
- 14 Güngör N, Karaoglan S. Interactions of polyacrylamide polymer with bentonite in aqueous systems. *Materials Letters*. 2001;48:168-175. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X\(00\)00298-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(00)00298-6)
- 15 Rossi S, Luckham PF, Zhu S, Briscoe BJ, Tadros TF. Influence of non-ionic polymers on the rheological behaviour of Na⁺ montmorillonite clay suspensions - Part II. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*. 1997;52(5):199-206.
- 16 Lecourtier J, Degouy D. Relations Between Structure and Efficiency of Polymeric Additives for Drilling Fluids. *Revue l'Institut Français du Pétrole*. 1994;49:177-186.
- 17 Amorim LV, Farias KV, Viana JD, Barbosa MIR, Pereira E, França KB *et al.* Fluidos de perfuração à base de água. Parte I: efeitos de aditivações poliméricas nas propriedades reológicas. *Cerâmica*. 2005;51(318):128-138. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132005000200010>
- 18 Sutherland IW. Microbial biopolymers from agricultural products: production and potential [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 1996;38:249-261. [http://dx.doi.org/10.1016/S0964-8305\(96\)00058-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0964-8305(96)00058-3)
- 19 Borges CD, Vendruscolo CT. Caracterização da goma xantana em função da cepa de *Xanthomonas campestris* pv *pruni* e das condições operacionais. *Ciências Biológicas e da Saúde*. 2008;29(2):171-179.
- 20 García-Ochoa F, Santos VE, Casas JA, Gómez E. Xanthan gum: production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*. 2000;18:549-579. [http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750\(00\)00050-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0734-9750(00)00050-1)
- 21 Luvielmo MM, Scamparini ARP. Goma xantana: produção, recuperação, propriedades e aplicação. *Estudos tecnológicos*. 2009;5(1):50-67. <http://dx.doi.org/10.4013/ete.2009.51.04>
- 22 Mayer L, Vendruscolo CT, Silva WP, Moura AB. AFLP analysis of *Xanthomonas Axonopodis* and *X. Arboricola* strains used in Xanthan production studies reveal high levels of polymorphism. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*. 2008;2:87-94.
- 23 Montgomery DC. Design and analysis of experiments. 5th ed. New York: Wiley Interscience; 2001.
- 24 Menezes RR, Brasileiro MI, Gonçalves WP, Santana LNL, Neves GA, Ferreira HS *et al.* Statistical design for recycling kaolin processing waste in the manufacturing of mullite-based ceramics. *Materials Research*. 2009;12(2):201-209. <http://dx.doi.org/10.1590/S1516-14392009000200015>
- 25 Cornell JA. Experiments with mixtures: designs, models and the analysis of mixture data. 3rd ed. New York: Wiley Interscience; 2002. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118204221>
- 26 Myers RH, Montgomery DC. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. New York: Wiley Interscience; 2002.
- 27 Correia SL, Hotza D, Segadães AM. Simultaneous optimization of linear firing shrinkage and water absorption of triaxial ceramic bodies using experiments design. *Ceramics International*. 2004;30(6):917-922. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2003.10.013>
- 28 Yahia A, Khayat KH. Experiment design to evaluate interaction of high-range water-reducer and antiwashout admixture in high-performance cement grout. *Cement and Concrete Research*. 2001;31(5):749-757. [http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00496-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00496-3)

- 29 Menezes RR, Malzac Neto HG, Santana LNL, Lira HL, Ferreira HS, Neves GA. Optimization of wastes content in ceramic tiles using statistical design of mixture experiments. *Journal of the European Ceramic Society*. 2008;28(16):3027-39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2008.05.007>
- 30 Rodrigues MI, Iema AF. Planejamento de experimentos e otimização de processos. Campinas: Cárita Editora; 2010.
- 31 Statsoft Inc. Programa de tratamento de dados. version 5.0. Statistica for Windows; 2000.
- 32 Barros Neto B, Scarminio IS, Bruns RE. Como fazer experimentos. Campinas: EdUnicamp; 2003.
- 33 Petrobras. Ensaio de viscosificante para fluidos usados na exploração e produção de poços de petróleo e gás – Métodos de ensaio. N-2605. Petrobras; 2003.
- 34 Amorim LV, Lira HL. Aplicação do planejamento experimental no estudo de fluidos inibidos isentos de cloro: Parte II. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*. 2011;6(2):109-117.
- 35 Lucena DV. Desenvolvimento de fluidos de perfuração com alto grau de inibição ambientalmente corretos [dissertação de mestrado]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2011.

Recebido em: 14/10/2013

Aceito em: 25/02/2014