



IBP1205_06

DESENVOLVIMENTO DE UM COMPOSTO POLIMÉRICO PARA USO EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BASE ÁGUA E ARGILA

Maria Ingrid R. Barbosa¹, Luciana V. Amorim², Klevson R. A. Barboza³, Heber C. Ferreira⁴

Copyright 2006, Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP

Este Trabalho Técnico foi preparado para apresentação na *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*, realizada no período de 11 a 14 de setembro de 2006, no Rio de Janeiro. Este Trabalho Técnico foi selecionado para apresentação pelo Comitê Técnico do evento, seguindo as informações contidas na sinopse submetida pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho Técnico, como apresentado, não foi revisado pelo IBP. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões do Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, seus Associados e Representantes. É de conhecimento e aprovação do(s) autor(es) que este Trabalho Técnico seja publicado nos Anais da *Rio Oil & Gas Expo and Conference 2006*.

Resumo

Este trabalho objetiva o desenvolvimento de um composto polimérico, utilizando planejamento experimental, para uso em fluidos de perfuração à base de água e argila visando a melhoria das suas propriedades reológicas e de filtração. Para este propósito, foram estudadas uma amostra de argila bentonítica e três amostras de aditivos poliméricos, sendo uma de poliácridamida parcialmente hidrolisada (PAM) e duas de carboximetilcelulose (CMC). O dimensionamento das composições do composto polimérico foi obtido por meio da metodologia de delineamento de misturas, sendo definidas dez composições. O composto polimérico foi misturado à argila seca, em diferentes concentrações, em seguida, preparados os fluidos de perfuração e determinadas as viscosidades aparente e plástica e o volume de filtrado segundo normas da Petrobras. Os resultados mostraram que o uso da metodologia de superfícies de resposta e otimização gráfica permite delimitar composições poliméricas, fazendo-se uso de matérias-primas de características diferentes, para aplicação em fluidos base água melhorando as suas propriedades.

Abstract

The aim of this work is to develop a polymeric compound using experimental design, for use in water and clay based drilling fluids aiming at the improvement the filtration and rheological properties. For this, one industrialized sodic bentonite clay sample and three polymer additives samples, being two samples of carboxymethylcellulose (CMC) and one sample of partially-hydrolyzed polyacrylamide (PAM) were studied. The compositions of polymeric compound were obtained through the methodology of mixture design, being defined ten compositions different. The polymeric compound with dry clay was mixed in different concentrations, and after, the drilling fluids were prepared according to the Petrobras standards and the apparent and plastic viscosities and water loss were measured. The results showed that the application of methodology of response surfaces and optimization graphic allowed to delimit polymeric compositions, x using raw materials with different characteristics, for application in water based drilling fluids. This treatment improves the properties of drilling fluids.

1. Introdução

Muitos produtos são formados pela mistura de vários componentes e as suas propriedades dependem das proporções desses componentes na mistura. Por esta razão, dentre as diversas técnicas de análise e planejamento experimentais, o uso do delineamento de misturas vem crescendo continuamente, despertando interesse nas universidades e indústrias (Zauberas, 2004). Nesse tipo de experimento os componentes são misturados, em quaisquer proporções, e uma resposta é obtida para cada conjunto de componentes. Assume-se, geralmente, que esta resposta é função somente das proporções, como por exemplo, massa e volume dos componentes presentes na mistura e não da quantidade total da mistura (Barros Neto et al., 1996).

¹ Aluna do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Eng. de Materiais (Bolsista ANP/PRH-25) – PPGCEMat/UAEMat/CCT/UFCG

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

³ Aluno de Graduação em Engenharia de Materiais – UAEMat/CCT/UFCG

⁴ Prof. Dr. da Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais – UAEMat/CCT/UFCG

O propósito geral em um experimento com misturas é tornar possível, por meio de superfícies de respostas, a estimativa das propriedades de um sistema multicomponente, a partir de um número limitado de observações. Essas observações são obtidas de combinações pré-selecionadas dos componentes na tentativa de se determinar quais delas, de alguma maneira, otimizam a resposta (Barros Neto et al., 1996) e também verificar como as respostas ou propriedades de interesse são afetadas pela variação das proporções dos componentes da mistura. Além disso, possibilita a utilização de otimização gráfica para determinação das composições (misturas) adequadas englobando todas as variáveis de interesse (Correia et al., 2004). Nesse caso, as proporções dos componentes (X_i) não são independentes, pois sua soma deve totalizar 100% (Cornell, 1990).

Com os resultados obtidos no delineamento de misturas, podem-se utilizar polinômios simplificados para relacionar a propriedade de interesse às diversas proporções utilizadas. Isso possibilita a previsão quantitativa das propriedades de qualquer formulação no sistema estudado, realizando somente alguns experimentos (Schabbach et al., 2003).

Este procedimento pode ser particularmente útil quando se pretende desenvolver um determinado produto com propriedades específicas. Além das equações de regressão obtidas para cada propriedade especificada, são definidas metas e exigências para cada uma (geralmente inequações que exprimem a gama de variação admitida), de acordo com as especificações do tipo de produto a ser fabricado, sendo obtido um sistema de inequações ou equações simultâneas, geralmente não lineares. A resolução desse sistema conduz à definição de composições (misturas das mesmas matérias-primas) mais adequadas que atendam às propriedades especificadas para a aplicação. A resolução do sistema pode ser obtida por otimização matemática (Gomes, 2004).

Os fluidos de perfuração base água são formados, geralmente, pela mistura de argilas e vários tipos de polímeros (naturais e/ou sintéticos), introduzidos de acordo com as condições da formação geológica onde o poço está sendo perfurado (Amorim, 2003). A principal função da água em fluidos de perfuração é oferecer o meio de dispersão para os materiais coloidais que controlam as viscosidades, limite de escoamento, forças géis e filtrados em valores adequados para conferir ao fluido uma boa taxa de remoção dos sólidos perfurados e capacidade de estabilização das paredes do poço (Thomas et al., 2001). Cada tipo de polímero possui características diferentes visando adequar todas as propriedades do fluido às condições de operação da perfuração do poço, visto que, cada tipo de aditivo (polímero) atende a propriedades específicas, mas não a todas as propriedades necessárias. Esta aditivação do fluido ocorre durante a sua preparação nos tanques de lama ou mesmo durante a operação de perfuração quando é detectada a necessidade de adequação/melhoria das suas propriedades. Dentre os inúmeros aditivos utilizados, destacam-se os aditivos orgânicos celulósicos e não-celulósicos, a exemplo do carboximetilcelulose (CMC) e da poliacrilamida parcialmente hidrolisada (PAM) que atuam, dependendo das suas características, como viscosificante, redutor de filtrado, lubrificante, inibidor e/ou encapsulador de argilas hidratáveis.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um composto polimérico, utilizando planejamento experimental, para uso em fluidos de perfuração de poços de petróleo à base de água e argila visando a melhoria das suas propriedades reológicas e de filtração.

2. Materiais

2.1. Argila Bentonítica

Foi estudada uma amostra de argila bentonítica sódica industrializada, fornecida pela Empresa Bentonit União Nordeste Ltda. – BUN, situada na Avenida Assis Chateaubriand, 3877, Campina Grande, PB.

2.2. Aditivos Poliméricos

Foram estudadas três amostras de aditivos poliméricos: dois aditivos à base de celulose, conhecidos por carboximetilcelulose, sendo uma amostra de baixa viscosidade (CMC BV) e uma amostra de alta viscosidade (CMC AV), e uma amostra de aditivo não-celulósico, a poliacrilamida parcialmente hidrolisada (PAM). As amostras de CMC foram fornecidas pela Empresa Denver-Cotia Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda., localizada na Estrada Fernando Nobre, 600-A, Rio Cotia, Cotia, SP, e a amostra de PAM foi fornecida pela Empresa System Mud Indústria e Comércio Ltda., localizada na Rua Otávio Muller, 204, Carvalho, Itajaí, SC.

3. Metodologia

3.1. Delineamento de Misturas

As composições, apresentadas na Tabela 1, foram formuladas com os polímeros PAM, CMC BV e CMC AV empregando a metodologia de modelagem de misturas do planejamento experimental (Cornell, 1990). Para definir as composições foi utilizado um planejamento em rede simplex $\{3,2\}$, aumentado com pontos no interior, totalizando dez pontos (dez composições).

Tabela 1. Delineamento das composições poliméricas.

Composições	PAM (%)	CMC BV (%)	CMC AV (%)
C1	100	0	0
C2	0	100	0
C3	0	0	100
C4	50	50	0
C5	50	0	50
C6	0	50	50
C7	33,33	33,33	33,33
C8	66,66	16,66	16,66
C9	16,66	66,66	16,66
C10	16,66	16,66	66,66

3.2. Preparação dos Fluidos de Perfuração

Os fluidos de perfuração foram preparados com concentração de 4,86% em massa de argila (24,3g de argila em 500 mL de água deionizada) de acordo com a norma N-2605 (Petrobras, 1998a).

A mesma metodologia foi seguida para os fluidos aditivados com polímeros/composições poliméricas (compostos poliméricos). Nesse caso, as argilas, na concentração supracitada, foi misturada manualmente com o polímero/composto polimérico em pó nas concentrações de 0,05g, 0,1g e 0,15g/24,3g de argila seca. No texto, as concentrações serão tratadas por 0,05, 0,1, e 0,15 g.

3.3. Estudo Reológico

Foram determinadas as viscosidades aparente (VA) e plástica (VP), em viscosímetro Fann 35A e o volume de filtrado em filtro prensa Fann, de acordo com a norma N-2605 (Petrobras, 1998a).

3.4. Estudo Estatístico

Na representação do ajuste dos valores de resposta (VA, VP e VF) foram utilizadas as equações dos modelos linear, quadrático e cúbico especial, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Equações dos modelos matemáticos.

Modelos matemáticos	Equações
Linear	$Y(x_1, x_2) = b_1x_1 + b_2x_2$
Quadrático	$Y(x_1, x_2) = b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$
Cúbico Especial	$Y(x_1, x_2) = b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$

Sendo:

Y = estimativa da resposta VA, VP e VF;

b = coeficientes da equação determinados conforme CORNELL (1990) e

x = proporção dos componentes na mistura.

Os resultados obtidos no estudo reológico foram usados para calcular (iterativamente, até serem obtidos modelos estatisticamente significativos) os coeficientes das equações de regressão que relacionam VA, VP e VF com as proporções dos polímeros presentes na mistura (composto polimérico/composições poliméricas).

Uma avaliação da eficiência dos modelos foi feita por meio de métodos estatísticos e comparação entre os resultados experimentais e os obtidos no modelo numérico.

Todas as regressões foram obtidas com auxílio do software Statistica 6.0.

Em termos gráficos, representado em diagrama triangular dos componentes, tem-se a intersecção da superfície de resposta das propriedades, sendo possível a determinação da região viável que conduz a composições que satisfazem as normas da Petrobras (1998b).

4. Resultados e Discussão

Na Tabela 3, estão apresentados os valores de VA, VP e VF para os fluidos de perfuração preparados com a argila aditivada com as composições do composto polimérico.

Tabela 3. Propriedades reológicas (VA e VP) e de filtração (VF) para os fluidos de perfuração preparados com a argila aditivada com as composições do composto polimérico.

Composições	PAM (%)	CMC BV (%)	CMC AV (%)	Concentração do Composto Polimérico (g / 24,3g de argila)	VA (cP)	VP (cP)	VF (mL)
C1	100	0	0	0,05	25,3	9,0	16,6
				0,10	34,5	9,0	17,4
				0,15	38,8	10,5	16,5
C2	0	100	0	0,05	9,0	3,5	16,0
				0,10	9,5	5,0	14,6
				0,15	10,0	5,0	13,6
C3	0	0	100	0,05	13,0	5,5	16,6
				0,10	14,0	5,0	14,0
				0,15	14,3	4,5	14,0
C4	50	50	0	0,05	15,5	7,0	16,6
				0,10	23,8	9,0	16,1
				0,15	31,0	9,5	13,5
C5	50	0	50	0,05	19,3	6,5	15,4
				0,10	27,0	9,0	14,4
				0,15	34,0	11,5	15,2
C6	0	50	50	0,05	10,5	4,0	15,2
				0,10	11,5	4,5	14,0
				0,15	11,5	5,0	13,2
C7	33,33	33,33	33,33	0,05	14,5	6,0	15,5
				0,10	21,3	8,5	15,4
				0,15	23,8	9,0	14,6
C8	66,66	16,66	16,66	0,05	19,5	7,5	15,8
				0,10	27,0	9,0	14,4
				0,15	36,5	11,5	16,0
C9	16,66	66,66	16,66	0,05	10,5	5,0	15,6
				0,10	12,8	5,8	14,5
				0,15	14,5	7,0	12,7
C10	16,66	16,66	66,66	0,05	12,8	5,5	16,4
				0,10	18,5	5,5	15,2
				0,15	17,3	7,5	12,7
Fluido preparado com argila bentonítica sem aditivação polimérica					11,0	4,5	17,4
Valores Especificados pela Petrobras (1998b)					≥15,0	≥4,0	≤18,0

Os resultados (Tabela 3) mostram que a aditivação polimérica da argila bentonítica melhora as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos de perfuração comparada ao resultado do fluido preparado com a argila sem aditivação, cujos valores das propriedades reológicas e de filtração são: VA = 11,0cP, VP = 4,5cP e VF = 17,4mL.

Uma análise mais detalhada mostra que as composições C1, C4, C5, C7, C8 e C10 apresentam os melhores resultados. Dentre elas, as composições C4, C7 e C10 evidenciam a interação entre os polímeros que compõem a mistura, observando-se a influência de cada tipo de aditivo polimérico sobre o comportamento reológico dos fluidos de perfuração, ou seja, que o CMC BV atua diminuindo o VF enquanto o CMC AV e a PAM atuam na viscosificação dos fluidos, sendo estes comportamentos definidos de acordo com o tamanho de cadeia dos polímeros, apresentando resultados satisfatórios que atendem as especificações da Petrobras para uso em fluidos de perfuração base água (Petrobras, 1998b), enquanto que as composições C1, C5 e C8, embora apresentem resultados de acordo com as especificações da Petrobras (Petrobras, 1998b), conduzem o sistema a um estado de maior floculação (elevados valores de VA), por apresentarem uma maior quantidade de PAM.

Tabela 3. Modelos matemáticos codificados para as propriedades reológicas, VA e VP, e VF dos fluidos preparados com a argila aditivada com as diferentes concentrações do composto polimérico.

Fluidos preparados com a argila aditivada com 0,05g do composto polimérico	
$VA = 25,43P_1^* + 8,95P_2^* + 12,87P_3^* - 7,86P_1P_2^* - 0,83P_1P_3^* - 3,77P_2P_3^*$	
$VP = 8,97P_1^* + 3,52P_2^* + 5,52P_3^* + 2,99P_1P_2^* - 3,01P_1P_3^* - 1,92P_2P_3^* + 6,88P_1P_2P_3^*$	
$VF = 16,51P_1^* + 15,93P_2^* + 16,8P_3^* + 1,08P_1P_2^* - 4,37P_1P_3^* - 3,93P_2P_3^*$	
Fluidos preparados com a argila aditivada com 0,10g do composto polimérico	
$VA = 35,46P_1^* + 8,63P_2^* + 13,99P_3^* + 8,22P_1P_2^* + 13,73P_1P_3^* - 1,92P_2P_3^*$	
$VP = 9,00P_1^* + 4,90P_2^* + 4,82P_3^* + 7,81P_1P_2^* + 7,64P_1P_3^* - 2,55P_2P_3^*$	
$VF = 16,94P_1^* + 14,57P_2^* + 19,65P_3^*$	
Fluidos preparados com a argila aditivada com 0,15g do composto polimérico	
$VA = 39,56P_1^* + 9,42P_2^* + 13,82P_3^* + 26,75P_1P_2^* + 30,35P_1P_3^* - 4,72P_2P_3^* - 104,19P_1P_2P_3^*$	
$VP = 10,62P_1^* + 4,98P_2^* + 4,48P_3^* + 6,75P_1P_2^* + 15,75P_1P_3^* + 0,48P_2P_3^*$	
$VF = 16,39P_1^* + 12,69P_2^* + 13,52P_3^*$	

Sendo: P_1 , P_2 e P_3 – proporções dos polímeros PAM, CMC BV e CMC AV, respectivamente.

* Estatisticamente significativos ao nível de 95,0 % de confiança.

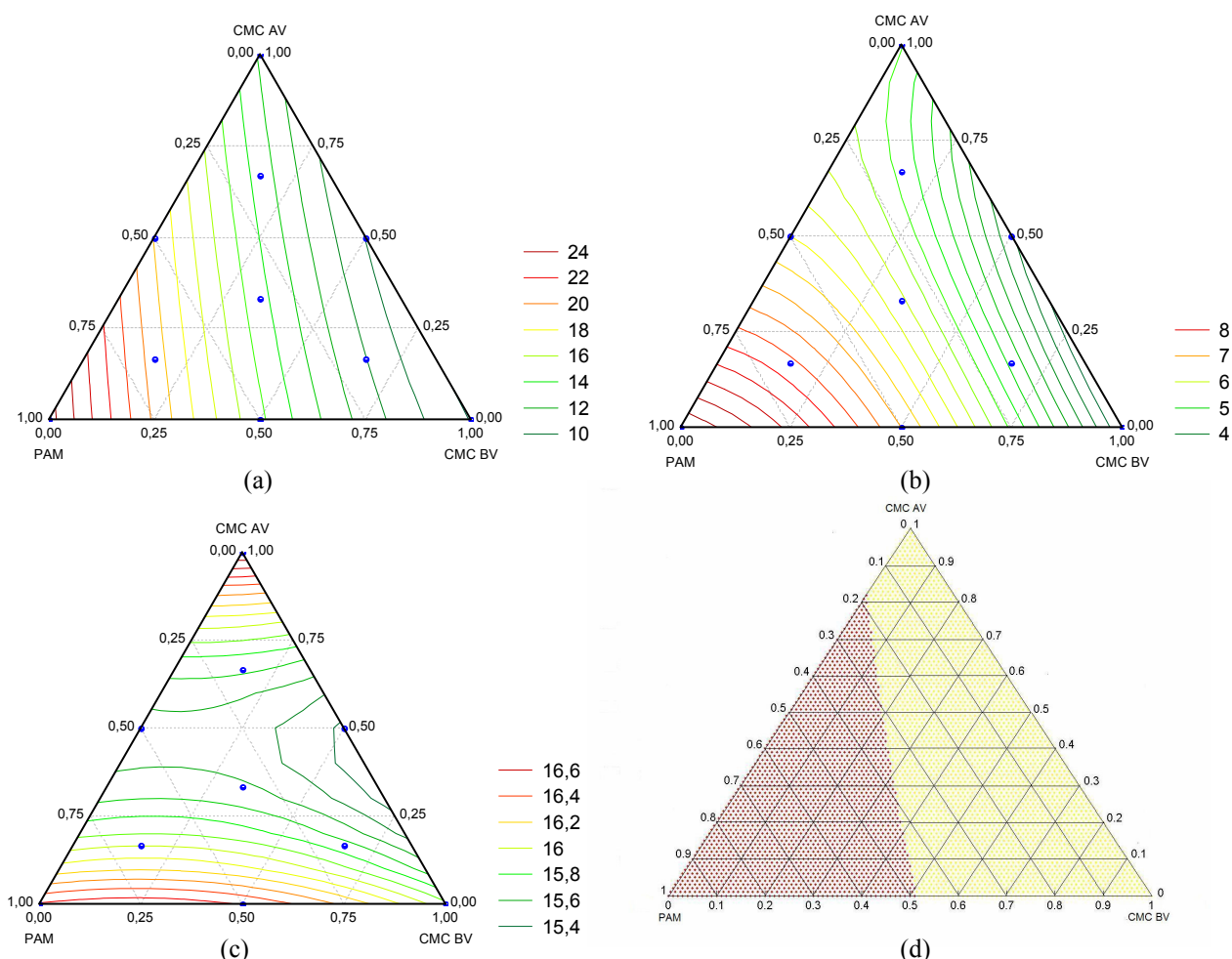


Figura 1. Curvas de nível para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,05g do composto polimérico para (a) VA, (b) VP e (c) VF e (d) intersecção das curvas de nível de VA, VP e VF, mostrando as composições adequadas para uso em fluidos de perfuração à base de água e argila.

Com os resultados experimentais (Tabela 3) foram obtidas equações de regressão de acordo com os modelos linear, quadrático e cúbico especial, correlacionando as proporções de polímeros presentes no composto polimérico com VA, VP e VF, escolhendo-se as que satisfazem um nível de significância de 5%. Os modelos matemáticos (estatisticamente significativos), para as concentrações estudadas do composto polimérico, correlacionando os valores de VA, VP e VF com as proporções dos polímeros PAM, CMC BV e CMC AV, são apresentados na Tabela 4.

Analisando os termos estatisticamente significativos dos modelos matemáticos apresentados na Tabela 4, para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,05g do composto polimérico, observa-se que na equação para VA os polímeros PAM e CMC BV interagem antagonisticamente, isto é, a interação entre esses polímeros contribui para a diminuição de VA. Na equação para VP, observa-se que os polímeros PAM e CMC BV interagem sinergicamente, ou seja, contribuem para elevar o valor desta propriedade, enquanto que a interação entre PAM e CMC AV e CMC BV e CMC AV, interagem antagonisticamente, contribuindo, assim, para a redução de VP.

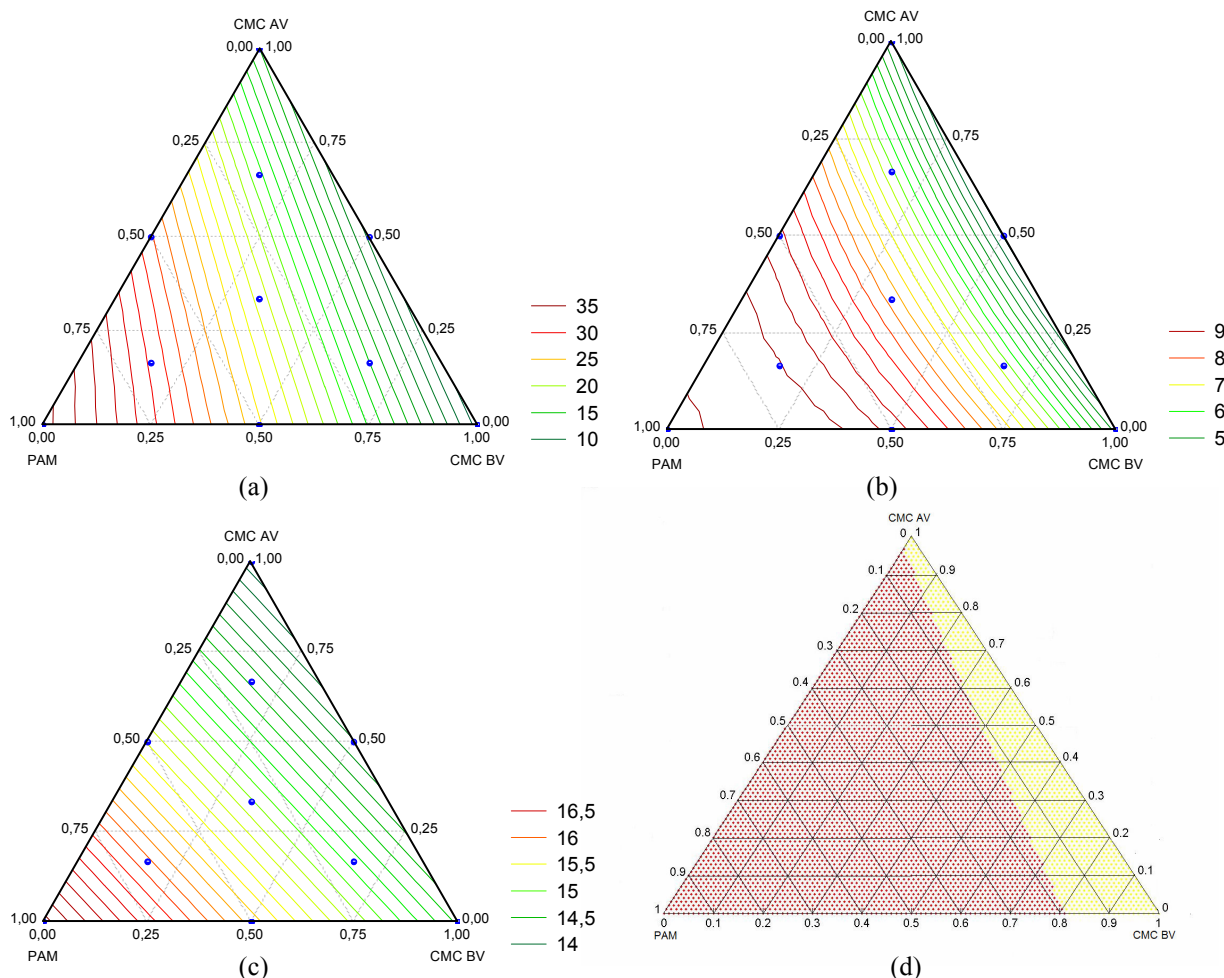


Figura 2. Curvas de nível para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,10g do composto polimérico para (a) VA, (b) VP e (c) VF e (d) intersecção das curvas de nível de VA, VP e VF, mostrando as composições adequadas para uso em fluidos de perfuração à base de água e argila.

Para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,05g do composto polimérico, os modelos matemáticos (Tabela 4), mostram que não há interação entre os polímeros presentes na mistura, não influenciando, portanto, VA, VP e VF. O mesmo comportamento pode ser observado para as equações apresentadas para VA e VF para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,15g do composto polimérico (Tabela 4). Para a propriedade VP (Tabela 4), observa-se que os polímeros PAM e CMC BV e PAM e CMC AV interagem sinergicamente.

Em todas as equações de regressão obtidas para os modelos, percebe-se a forte influência da PAM (P_1) sobre as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos. Contudo, os dados reológicos evidenciaram a ação de cada um dos aditivos e sua influência sobre as viscosidades aparente (VA) e plástica (VP) e sobre o volume de filtrado (VF); os polímeros de alta viscosidade (PAM e CMC AV) atuam mais fortemente no aumento das viscosidades, enquanto que o de baixa viscosidade (CMC BV) age na redução das perdas por filtração.

As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as curvas de nível, referentes à projeção das superfícies de resposta, calculadas para os valores de VA, VP e VF, e a intersecção das áreas definidas para cada propriedade individual (VA, VP e VF), apresentando a localização da região individual (região viável, em vermelho) de composições que satisfazem as especificações da Petrobras (1998b) para uso em fluidos de perfuração de poços de petróleo à base de água e argila, para os teores de composto polimérico estudados, 0,05g, 0,10g e 0,15g, respectivamente.

Analisando as curvas de nível, referentes à projeção das superfícies de resposta (Figuras 1, 2 e 3), observa-se que as propriedades reológicas (VA e VP) e de filtração (VF) dos fluidos estudados são influenciadas pela concentração dos aditivos poliméricos que compõem a mistura (composto polimérico/composições poliméricas).

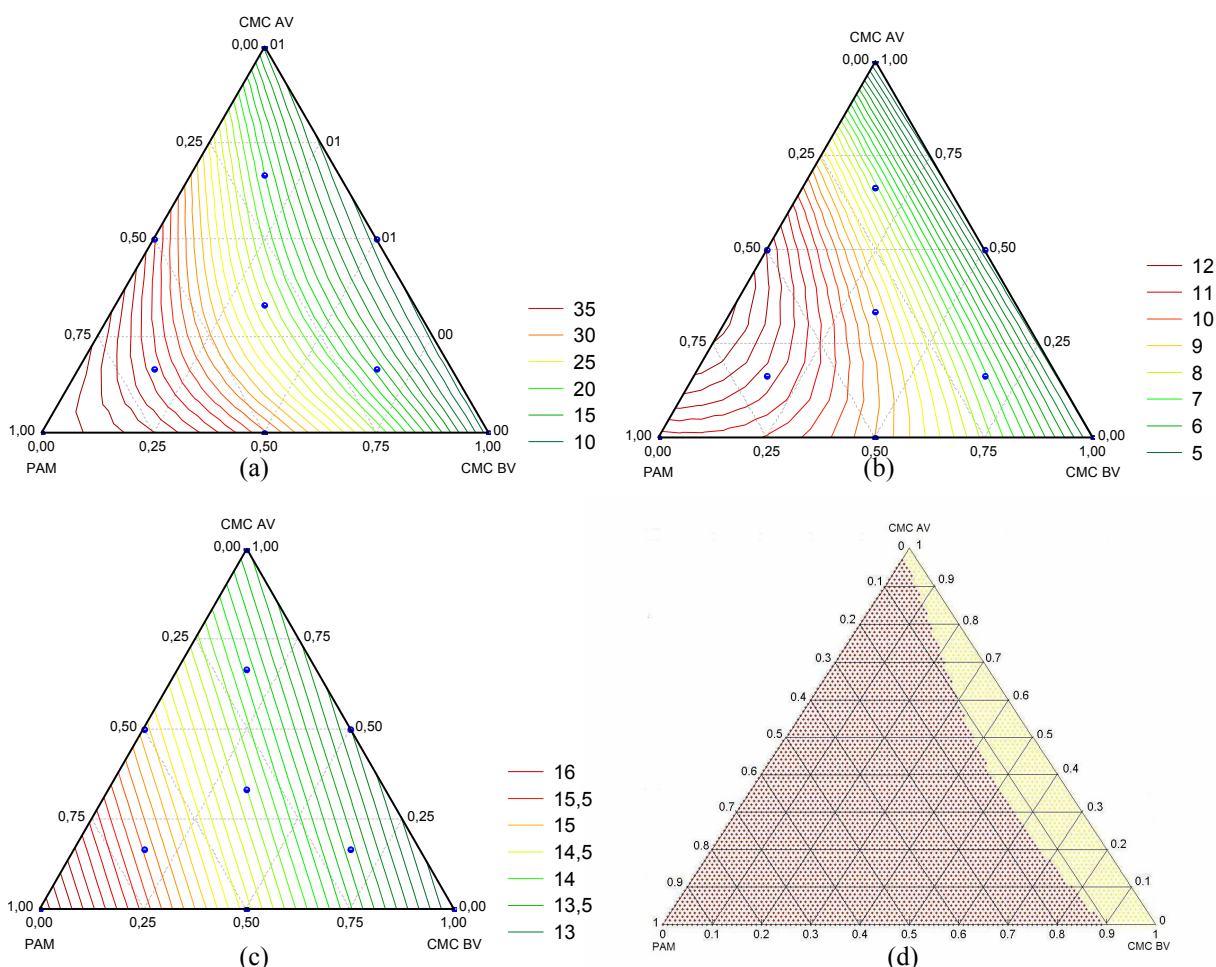


Figura 3. Curvas de nível para os fluidos preparados com a argila aditivada com 0,15g do composto polimérico para (a) VA, (b) VP e (c) VF e (d) intersecção das curvas de nível de VA, VP e VF, mostrando as composições adequadas para uso em fluidos de perfuração à base de água e argila.

De acordo com as Figuras 1 (a), 1 (b), 2 (a), 2 (b), 3 (a) e 3 (b) observa-se que os maiores valores de VA e VP encontram-se para as composições localizadas próximas ao vértice referente a PAM, ou seja, que o aumento na fração mássica desse polímero conduz a elevação das viscosidades, uma vez que polímeros de cadeia muito longa têm como função a viscosificação do sistema (Pereira, 2002) e, conseqüentemente, quanto maior a sua concentração no fluido, maior será o aumento nos valores de VA e VP.

Em qualquer ponto da superfície de resposta, a VP (Figura 1 (b), 2 (b) e 3 (b)) e o VF (Figura 1 (c), 2 (c) e 3 (c)) dos fluidos estão de acordo com os limites especificados pela Petrobras (1998b). O VF atinge valores máximos à medida que se observa um aumento na fração mássica de PAM e de CMC AV e uma redução na porcentagem de CMC BV na composição. Este comportamento confirma os dados experimentais (Tabela 3) e os estudos de diversos pesquisadores mostrando que polímeros de cadeia curta agem principalmente na redução das perdas por filtração e que as interações argila/polímero retêm as moléculas de água diminuindo assim a quantidade de água livre no sistema e, conseqüentemente, o volume de filtrado. Além disso, evidencia que a mistura de polímeros de diferentes características conduz a definição de composições mais adequadas que atendam às propriedades especificadas para a aplicação em fluidos de perfuração hidroargilosos (Petrobras, 1998b).

A solução do sistema de inequações formado pelas equações de regressão (Tabela 3) e pelas restrições estabelecidas pela Petrobras (1998b), conduziu a composições que, de acordo com os modelos matemáticos escolhidos, são adequadas para produzir fluidos de perfuração que atendam as normas da Petrobras (1998b).

As Figuras 1 (d), 2 (d) e 3 (d), mostram a intersecção das áreas definidas para cada propriedade individual (VA, VP e VF), apresentando a região (região viável, em vermelho) de composições que atende as normas da Petrobras

(1998b), ou seja, todas as composições que se encontram na região viável, provavelmente, produzem fluidos de perfuração à base de água e argila que atendem as especificações vigentes (Petrobras, 1998b).

5. Conclusões

- Os fluidos preparados com a argila aditivada com o composto polimérico nas composições C4, C5, C7 e C10 apresentam melhores propriedades reológicas e de filtração, atendendo às especificações da Petrobras;
- as equações de regressão obtidas para VA, VP e VF, nas diferentes concentrações, evidenciam a forte influência da PAM sobre as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos e;
- as superfícies de resposta, projetadas em função dos valores de VA, VP e VF determinados experimentalmente, mostram que os experimentos realizados ajustam-se aos modelos matemáticos obtidos para cada variável.

Em resumo, este estudo mostra que a combinação de matérias-primas poliméricas de características diferentes possibilita a obtenção de um composto polimérico com propriedades adequadas para a aditivação de bentonitas, melhorando o comportamento reológico e de filtração dos fluidos de perfuração base água, com propriedades de acordo com as especificações da Petrobras, podendo minimizar as etapas de aditivação frequentes em campo.

6. Agradecimentos

À ANP, FINEP, CNPq/CTPETRO e MCT pelo apoio financeiro. Às Empresas System Mud Indústria e Comércio Ltda., Denver-Cotia Indústria e Comércio de Produtos Químicos Ltda. e Bentonit União Nordeste Ltda. – BUN pelo fornecimento das amostras de polímeros e argila, e ao LABDES/UFCG pelo uso das suas instalações.

7. Referências Bibliográficas

- AMORIM, L.V. *Melhoria, Proteção e Recuperação da Reologia de Fluidos Hidroargilosos para Uso na Perfuração de Poços de Petróleo*, Tese de D.Sc., Engenharia de Processos/UFCG, Campina Grande, PB, Brasil, 2003.
- BARROS NETO, B., SCARMINIO, I.E., BRUNS, R.E. *Planejamento e Otimização de Experimentos*, 2º edição, Editora Unicamp, 1996.
- CORNELL, J. A. *Experiments with Mixtures-Designs, Models, and the Analysis of Mixtures Data*, 2nd edition, Wiley, 1990.
- CORREIA, S. L., HOTZA, D., SEGADÃES, A. M. Otimização da Resistência Mecânica de Corpos Cerâmicos em Função de Matérias-Primas e Restrições de Propriedades Tecnológicas, In: *Congresso em Ciência dos Materiais do Mercosul - SULMAT*, Joinville, SC, Setembro de 2004.
- GOMES, C. M. *Avaliação do Comportamento Reológico de Suspensões Cerâmicas Triaxiais Utilizando Abordagem do Delineamento de Misturas*, Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2004.
- PEREIRA, E. Química dos Polímeros e Aplicações – Partes I, II, III e IV, www.systemmud.com.br. Acesso em julho de 2002.
- PETROBRAS. Ensaio de Viscosificante para Fluido de Perfuração Base de Água na Exploração e Produção de Petróleo, Método, N-2605, 1998a.
- PETROBRAS. Argila ativada para fluido de perfuração à base de água na exploração e produção de petróleo, Especificação, N-2604, 1998b.
- SCHABBACH, L. M., OLIVEIRA, A. P. N., FREDEL, M. C., HOTZA, D. *American Ceramic Society Bulletin*, v.82, p.47-50, 2003.
- THOMAS, J. E., *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Petrobras, 2001.
- ZAUBERAS, R. T., GOMES, P. L. S., DINIZ, C. A. R., BOSCHI, A. O. Planejamento Estatístico de Experimentos Aplicado ao Desenvolvimento de Formulações para Revestimentos Cerâmicos, *Cerâmica*, v.50, p.33-37, 2004.