

## Avaliação dos Efeitos da Incorporação de Sólidos Finos nas Propriedades de Fluidos de Perfuração Olefínicos a Partir de um Planejamento Experimental

A. C. A. Costa<sup>1\*</sup>, R. C. A. M. Nascimento<sup>2</sup>, E. A. Sousa<sup>3</sup>, L. V. Amorim<sup>4</sup>, H. L. Lira<sup>1</sup>

<sup>1\*</sup>Departamento de Engenharia de Materiais, PPGCEMat/ CCT/ UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58109-970, Campina Grande – PB

<sup>2</sup>Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho – UFRPE, Rod. Armínio Guilherme, 2635 - Garapu, Cabo de Santo Agostinho - PE

<sup>3</sup>Cenpes - Centro de Pesquisa da Petrobras, Ilh Cidade Universitária - Cidade Universitária, CEP 21941-970, Rio de Janeiro – RJ

<sup>4</sup>Unidade Acadêmica de Engenharia de Petróleo, UAPetro/CCT/UFCG, Av. Aprígio Veloso, 882, CEP 58109-970, Campina Grande – PB

(Recebido em 27/06/2018; revisado em 28/06/2018; aceito em 12/07/2018)  
(Todas as informações contidas neste artigo são de responsabilidade dos autores)

### Resumo:

Este trabalho tem como objetivo avaliar a influência da incorporação conjunta de sólidos finos (areia, argila bentonítica, carbonato de cálcio e NaCl) nas propriedades de fluidos de perfuração olefínicos a partir de um planejamento experimental com configuração estrela. Para isso, foi selecionado um fluido sintético olefínico com densidade inicial de 9,4 lb/gal e separadas 28 alíquotas de 350 mL de fluido. Após o envelhecimento dinâmico, os sólidos foram adicionados de acordo com o planejamento experimental. Para estudar a influência dessas incorporações foram determinadas em laboratório as seguintes propriedades: densidade, viscosidade plástica, limite de escoamento, força gel e estabilidade elétrica. Os resultados mostram que os sólidos incorporados, em conjunto, atuam como contaminantes para os fluidos, visto que alteram suas propriedades, aumentando os valores de densidade, viscosidade plástica, limites de escoamento e força gel e reduzindo os valores de estabilidade elétrica, sendo a argila bentonítica responsável por maior influência na força gel e o NaCl por maiores influências na viscosidade plástica e na estabilidade elétrica.

**Palavras-chave:** Fluido olefínico, sólidos finos, propriedades

### Abstract:

This work studied the influence of the joint incorporation of fine solids (sand, bentonite clay, calcium carbonate and NaCl) in the properties of olefinic drilling fluids from an experimental design with star configuration. An olefinic synthetic fluid with initial density of 9.4 lb / gal was selected and 28 aliquots of 350 mL fluid separated. After dynamic aging, the solids were added according to experimental design. To study the influence of these incorporations the following properties were determined in the laboratory: density, plastic viscosity, flow limit, gel strength and electrical stability. The results show that the incorporated solids, together, act as contaminants for the fluids, since they change their properties, increasing the values of density, plastic viscosity, flow limits and gel strength and reducing the values of electrical stability, being the clay bentonite responsible for greater influence on gel strength and NaCl due to higher influences on plastic viscosity and electrical stability.

**Keywords:** Olefinic fluid, fine solids, properties

### 1. Introdução

Os fluidos de perfuração são responsáveis por diversas funções necessárias à construção de um poço de petróleo e gás, desde a remoção dos fragmentos da rocha (cascalho) produzidos durante a perfuração até manter a estabilidade do poço, além de agir como fluido lubrificante e refrigerador para a broca de perfuração [1].

Dentre os diversos tipos de fluidos, tem-se os fluidos sintéticos, que são emulsões inversas (água em óleo) contendo duas fases não miscíveis, uma fase interna de água e uma fase

contínua de base sintética que pode ser éter, ésteres, poli-alfa-olefinas, acetais, alfa-olefinas lineares, olefinas internas e parafinas lineares.

Fatores como toxicidade, taxa de biodegradação, impactos ambientais e custos, levaram a substituição da n-parafina por bases sintéticas formulados essencialmente com olefinas e estéres. Para aplicações em perfurações de poços profundos, as olefinas são preferencialmente aplicadas por apresentarem vantagens como menor custo e maior estabilidade a altas temperaturas [2].

\*E-mail: anna.amorim@gmail.com (A. C. A. Costa)

Quando um fluido sintético é utilizado na perfuração, ocorre a incorporação de sólidos que tende a aumentar com o número de vezes que o mesmo é reutilizado. Os efeitos prejudiciais dos sólidos perfurados acumulados em fluidos de perfuração têm sido uma preocupação industrial, pois estes sólidos são componentes inevitáveis de todos os fluidos de perfuração. Pequenas quantidades de sólidos incorporados, no processo de perfuração, não são prejudiciais, mas se estas pequenas quantidades são continuamente recirculadas, sérios problemas podem ocorrer [3]. O aumento do teor de sólidos nos fluidos de perfuração também pode provocar desgaste dos equipamentos e má limpeza do poço [4].

De acordo com Caenn [4], a incorporação de sólidos provenientes das formações perfuradas alteram as propriedades dos fluidos de perfuração e as mais afetadas são a densidade, os parâmetros reológicos, os parâmetros de filtração e a estabilidade elétrica.

A incorporação de sólidos finos em fluidos sintéticos parafínicos exerce diferentes influências sobre as propriedades do fluido, sendo elas, dependentes do tipo de sólido. Em seu estudo, Silva [1] evidenciou que a argila bentonítica é responsável por alterar as propriedades reológicas e o volume de filtrado, enquanto que, o carbonato de cálcio exerce maior influência sobre a densidade e a estabilidade elétrica.

Diante do exposto, este trabalho objetiva avaliar a influência da incorporação conjunta de diferentes sólidos finos nas propriedades de fluidos de perfuração olefinicos, a partir de um planejamento experimental com configuração estrela.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Materiais

Para esta pesquisa, foram utilizados um fluido sintético base olefina com densidade inicial de 9,4 lb/gal, fornecido pela Petrobras, e os sólidos: areia, argila, carbonato de cálcio e cloreto de sódio. A argila de granulometria inferior a

0,044mm (Mesh 325) foi fornecida pela BUN – Bentonit União Nordeste, o carbonato de cálcio (2-44 $\mu$ ) e a areia com granulometria de 0,074mm (Mesh 200) foram fornecidos pela Petrobras, enquanto que o cloreto de sódio - NaCl (sal de cozinha refinado) foi adquirido no comércio local.

### 2.2 Métodos

O estudo das propriedades dos fluidos sintéticos olefinicos incorporados com sólidos finos foi realizado a partir das medições, em laboratório, das propriedades densidade ( $\rho$ ), viscosidade plástica (VP), limite de escoamento (LE), força gel (FG) e estabilidade elétrica (EE).

Os sólidos foram incorporados ao fluido segundo uma matriz de planejamento para quatro variáveis independentes (areia, argila bentonítica, carbonato de cálcio e NaCl), com configuração estrela, totalizando 28 combinações de contaminação. A regressão dos dados experimentais foi realizada utilizando o software STATISTICA (STATSOFT), versão 7.0 [5]. Utilizando esta ferramenta e análise de superfície de resposta é possível investigar a influência de determinadas variáveis em um processo e a sua forma de interação. A Tabela 1 apresenta os níveis codificados e reais das proporções de cada contaminante adicionado aos fluidos.

Inicialmente, os fluidos recebidos pela PETROBRAS, foram agitados em suas bambonas para garantir a sua homogeneização. Em seguida, foram separadas alíquotas de 350mL. Essas alíquotas foram agitadas durante 5 minutos em agitador de alta rotação da marca *Hamilton Beach*. Por fim, os fluidos foram submetidos ao envelhecimento térmico a 93,3°C (200°F) por 16h, em um forno *Roller Oven* da marca Fann.

Após o envelhecimento térmico e adição dos sólidos finos, foram realizados ensaios de densidade, reologia, estabilidade elétrica e volume de filtrato HPHT. A densidade foi medida diretamente por meio de uma balança dessimétrica pressurizada FANN 141. Os fluidos foram colocados na balança até total preenchimento e, em seguida, pressurizada utilizando um pistão contendo o próprio fluido.

Tabela 1 - Níveis codificados e reais das variáveis de entrada

Variáveis	- $\alpha$ (%)	-1(%)	0(%)	+1(%)	+ $\alpha$ (%)
Areia	0 (0g)	2,83 (9,905g)	7,5 (26,25g)	12,17 (42,595g)	15 (52,5g)
Argila	0 (0g)	2,83 (9,905g)	7,5 (26,25g)	12,17 (42,595g)	15 (52,5g)
Carbonato de cálcio	0 (0g)	2,83 (9,905g)	7,5 (26,25g)	12,17 (42,595g)	15 (52,5g)
NaCl	0 (0g)	0,94 (3,29g)	2,5 (8,75g)	4,06 (14,21g)	5 (17,5g)

As propriedades reológicas foram obtidas por meio de ensaios realizados em um viscosímetro da marca FANN modelo 35A. Seis valores de deflexão foram lidos conforme os seguintes procedimentos:

- Agitação da amostra por 5 minutos a uma velocidade de 17.000 rpm e em seguida transferiu a amostra para um copo térmico da marca FANN, com o objetivo de manter o fluido a uma temperatura de aproximadamente

65,6°C (150°F) de modo que se possa reproduzir as condições de operação;

- As leituras da deflexão em graus foram realizadas com as seguintes taxas de rotação: 600 e 300 rpm;
- Para obtenção da força gel inicial ( $G_i$ ), o fluido foi submetido a uma taxa de rotação de 600 rpm durante 15 s, em seguida, permaneceu em repouso durante 10 s. Logo após,

acionou-se o viscosímetro na taxa de cisalhamento de 3 rpm efetuando-se a leitura;

- Para a obtenção da força gel final ( $G_f$ ), o fluido foi submetido a uma taxa de rotação de 600 rpm durante 15 s e em seguida deixado em repouso durante 10 min, logo após, foi efetuada a leitura sob taxa de rotação de 3 rpm.

Com os dados das leituras obtidas no viscosímetro, foram calculadas a viscosidade plástica (VP), limite de escoamento (LE) e a força gel (FG) segundo conforme as equações 1, 2 e 3 abaixo:

- Viscosidade plástica (VP):

$$VP = L600 - L300 \text{ (cP)} \quad (1)$$

- Limite de escoamento (LE):

$$LE = L300 - VP \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (2)$$

- Força gel:

$$FG = G_f - G_i \text{ (N/m}^2\text{)} \quad (3)$$

Para medir a estabilidade elétrica (EE) foi utilizado o medidor de estabilidade elétrica da marca FANN modelo 23D. As medidas foram realizadas com a amostra de fluido no copo térmico a uma temperatura de aproximadamente 65,6°C (150°F) logo após o ensaio reológico.

Nesta etapa o fluido foi agitado levemente e as leituras foram feitas por meio da introdução do eletrodo diretamente na emulsão. Foram realizadas cinco medições, destas, as de menor e de maior valor foram eliminadas. Com as demais foram calculados os valores médios de estabilidade elétrica.

### 3 Resultados

A Tabela 2 apresenta as estatísticas relevantes para a análise de variância (ANOVA) estatística das propriedades  $\rho$ , VP, LE, FG e EE para os fluidos contaminados com os sólidos argila bentonítica, areia, carbonato de cálcio e NaCl, em conjunto, segundo os níveis codificados e reais da Tabela 1.

Tabela 2 - Estatísticas relevantes para a análise de variância (ANOVA) e modelos matemáticos codificados das propriedades  $\rho$ , VP, LE, FG e EE dos fluidos contaminados com os sólidos (argila bentonítica, areia, carbonato de cálcio e NaCl) em conjunto

	P	VP	LE	FG	EE
<i>Coefficiente de Correlação (R)</i>	0,98	0,73	0,65	0,59	0,73
<i>% Variação explicada*</i>	97,3%	52,8%	42,5%	35,2%	53,7%
<i>F<sub>calculado</sub>/F<sub>tabelado</sub></i>	13,32	0,41	0,27	0,20	0,43
<b>Modelos matemáticos codificados para os fluidos preparados</b>					
$\rho \text{ (lb/gal)} = 10,353 \pm 0,029 + (0,179A \pm 0,013) - (0,041A^2 \pm 0,017) + (0,162Ag \pm 0,013) + (0,162C \pm 0,013) + (0,045NaCl \pm 0,013) - (0,037Ag * C \pm 0,015) \quad (4)$					
$VP \text{ (cP)} = 26,643 \pm 2,616 + (2,821NaCl \pm 1,252) \quad (5)$					
LE - não foram obtidos resultados estatisticamente significativos					
FG <sub>10</sub> - não foram obtidos resultados estatisticamente significativos					
$EE \text{ (V)} = 449,071 \pm 16,811 - (24,544NaCl \pm 8,044) \quad (6)$					

Sendo: A – areia, Ag – argila, C – carbonato de cálcio, NaCl – sal,  $\rho$  – densidade, VP – viscosidade plástica, LE – limite de escoamento, FG<sub>10</sub> – força gel e EE – estabilidade elétrica

\* ao nível de 90,0% de confiança.

O coeficiente de determinação ou explicação (R) 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% [6]. Verificou-se que o ajuste do modelo foi satisfatório para a densidade ( $\rho$ ), com coeficiente de correlação de 0,98 e porcentagem de variação explicada ( $R^2$ ) de 97,3% ao nível de confiança de 90%.

O teste F mostra se há relação entre as variáveis dependentes ( $\rho$ , VP, LE, FG e EE) e independentes (areia, argila bentonítica, carbonato de cálcio e NaCl). Por meio da análise de variância da Tabela 2, verificou-se que a razão entre o  $F_{calculado}$  e o  $F_{tabelado}$  foi superior a 5 para a densidade ( $\rho$ ), com 90% de confiança, o que mostra que o modelo foi

bem ajustado, sendo este, estatisticamente significativo e preditivo [7].

A partir das estatísticas apresentadas na Tabela 2, foram obtidas equações de regressão para o modelo estudado, correlacionando as proporções dos contaminantes (areia, argila, carbonato de cálcio e NaCl) com as propriedades estudadas ( $\rho$ , VP, LE, FG e EE). Os modelos foram obtidos a partir da regressão linear dos dados experimentais, utilizando o software *Statistica*, versão 7 [5].

As equações da Tabela 2 mostram a influência dos contaminantes nas propriedades estudadas.

Observa-se que a densidade ( $\rho$ ) é influenciada pela adição de todos os contaminantes, sendo a areia o contaminante que apresenta maior influência. Isso pode ser comprovado pelo

valor da densidade da areia, que, sendo ela formada por quartzo, tem valores médios de 2,65g/cm<sup>3</sup>. Em termos gerais, a densidade aumenta para todas as quantidades e combinações de sólidos adicionados ao fluido e isso ocorre pelo aumento na quantidade de partículas sólidas no fluido.

A partir da equação 5, tem-se que a viscosidade plástica (VP) é influenciada significativamente pela adição de NaCl, ou seja, o aumento da VP é observado quando se tem um aumento de NaCl no fluido.

A adição de contaminantes não é estatisticamente significativa para o limite de escoamento (LE) e para a força gel (FG).

Observa-se que a estabilidade elétrica (EE) foi alterada negativamente pelo NaCl, ou seja, o aumento da quantidade de NaCl no fluido reduz os valores de estabilidade elétrica.

Os resultados obtidos são significativos ao nível de 90% de confiança. Assim, os modelos apresentados na Tabela 2 podem ser considerados estatisticamente significativos para a densidade ( $\rho$ ), viscosidade plástica (VP) e estabilidade elétrica (EE) em função das proporções de sólidos incorporados ao fluido.

Nas Figuras 1 a 5 estão apresentadas as superfícies de resposta para as propriedades de densidade, viscosidade plástica, limite de escoamento, força gel e estabilidade elétrica. Essas superfícies foram geradas a partir das equações de 4 a 6, para os níveis -1 e +1 do planejamento experimental, apresentados na Tabela 1. Nestas Figuras, observa-se a influência de dois contaminantes, enquanto outros dois foram fixados nos níveis citados.

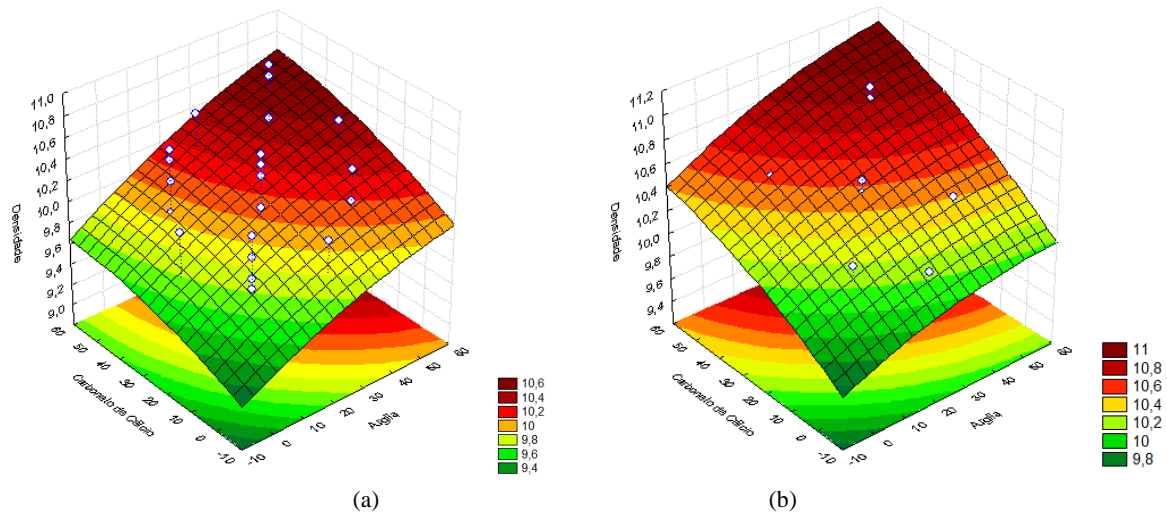


Figura 1 – Superfícies de resposta para densidade fixando (a) no nível -1 areia e NaCl e (b) +1 areia e NaCl

A partir da análise das superfícies de resposta da Figura 1 observa-se que os sólidos incorporados aumentaram os valores de densidade dos fluidos. Observa-se também, uma tendência ao aumento da densidade quando dois sólidos são analisados em conjunto e outros dois são fixados. O aumento

do nível -1 (9,905g de contaminante) para o nível +1 (26,25g de contaminante) promoveu um aumento nos valores de densidade, visto que, maiores valores de sólidos foram incorporados aos fluidos.

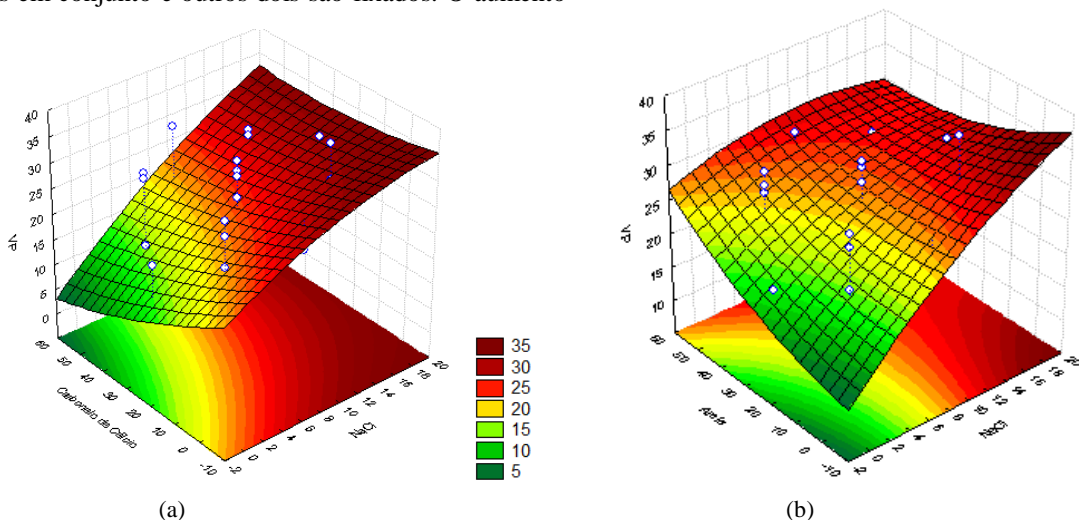


Figura 2 - Superfícies de resposta para viscosidade plástica fixando (a) no nível -1 areia e argila e (b) no nível +1 argila e carbonato de cálcio

É sabido que a viscosidade plástica é a resistência ao escoamento provocada pelo atrito entre as partículas dispersas e entre as próprias moléculas do líquido dispersante [8]. A partir da análise das superfícies de resposta para a viscosidade plástica (Figura 2), observou-se um aumento nessa propriedade com a incorporação de sólidos, que irá aumentar a resistência do fluido ao escoamento. Há uma tendência de aumento quando do aumento do teor de sólidos, bem como a presença de NaCl, que aumenta a viscosidade plástica em

maiores proporções, conforme evidenciado no modelo matemático descrito da Tabela 1.

As Figuras 3 (a) e (b) apresentam as superfícies de resposta para o limite de escoamento. Limite de escoamento é definido como sendo as forças de interação entre as partículas dispersas e que irá aumentar quando tais forças aumentam, isto é, quando aumenta o potencial iônico do meio, causando um conseqüente aumento das forças eletrostáticas de interação entre as partículas dispersas [8].

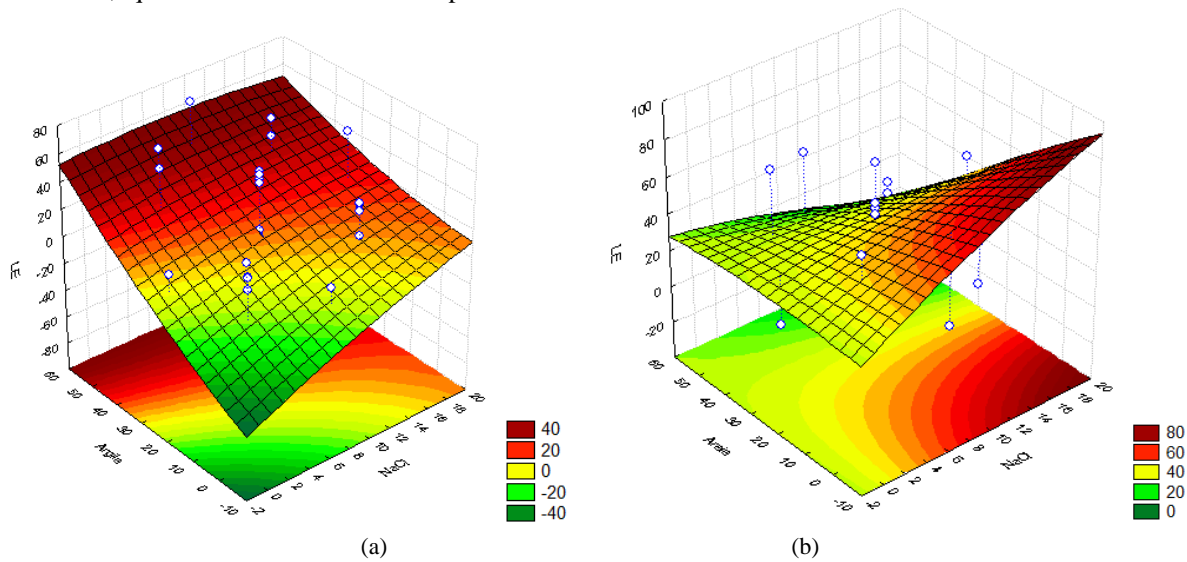


Figura 3 - Superfícies de resposta para limite de escoamento fixando (a) no nível -1 areia e argila e (b) no nível +1 argila e carbonato de cálcio

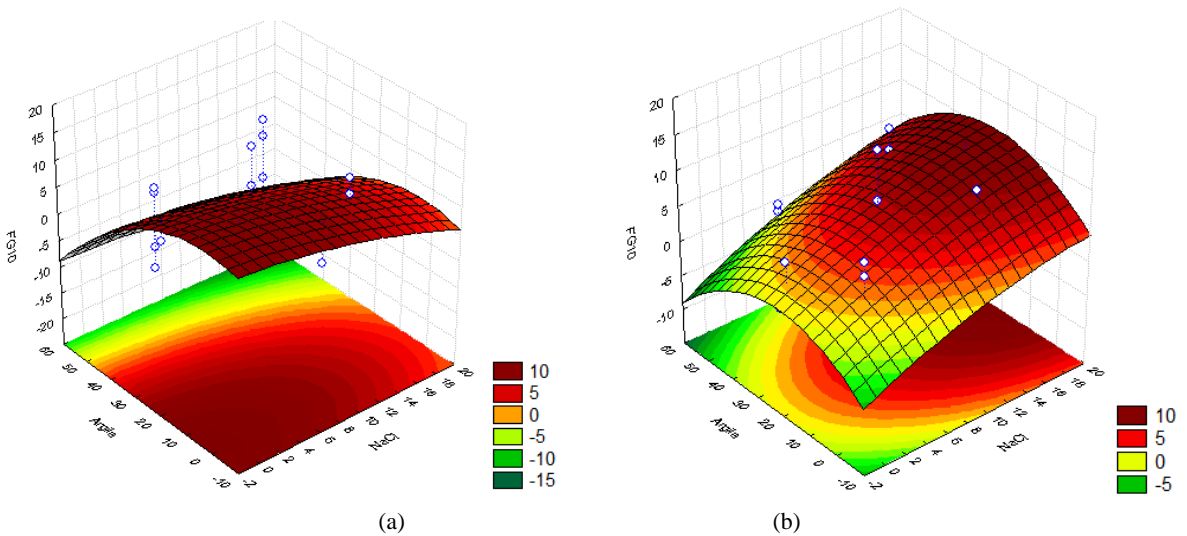


Figura 4 - Superfícies de resposta para força gel fixando (a) no nível -1 areia e carbonato de cálcio e (b) no nível +1 areia e carbonato de cálcio

A incorporação, independente dos teores de sólidos, promove o aumento do limite de escoamento visto que, a quantidade de partículas sólidas aumenta, aumentando a interação entre elas. Levando em consideração que a argila, carregada eletricamente, e o NaCl, um eletrólito, são os sólidos que mais influenciam nessa propriedade, sua

incorporação pode ter mudado o ambiente iônico do meio. O mesmo comportamento é observado para a força gel (Figura 4), que é a medida da tixotropia do fluido, ou seja, a capacidade que o fluido tem de adquirir um estado semi-rígido quando está em repouso, mantendo os detritos em suspensão, e voltar a um estado de fluidez quando em

movimento, levando os detritos à superfície. Observa-se uma tendência ao aumento no valor dessa propriedade quando do aumento da quantidade de sólido, sendo a argila o responsável por conferir tixotropia ao fluido de perfuração.

A partir da análise das superfícies de resposta da Figura 5 observa-se uma tendência à redução da estabilidade elétrica com o aumento de sólidos no fluido. A estabilidade elétrica da emulsão é um indicativo de quão fortemente a água está emulsionada numa base orgânica. Altos valores indicam uma

emulsão mais forte e, portanto, um fluido mais estável [9]. A partir da análise conjunta do modelo matemático e das superfícies de resposta, pode-se comprovar que o aumento do teor de NaCl reduz a estabilidade elétrica, indicando que o sólido não se comporta como uma película protetora, promovendo assim a coalescência das gotas. Embora os valores de estabilidade elétrica estando acima de 200 V possam ser considerados elevados, não necessariamente tem-se fluidos com propriedades preservadas.

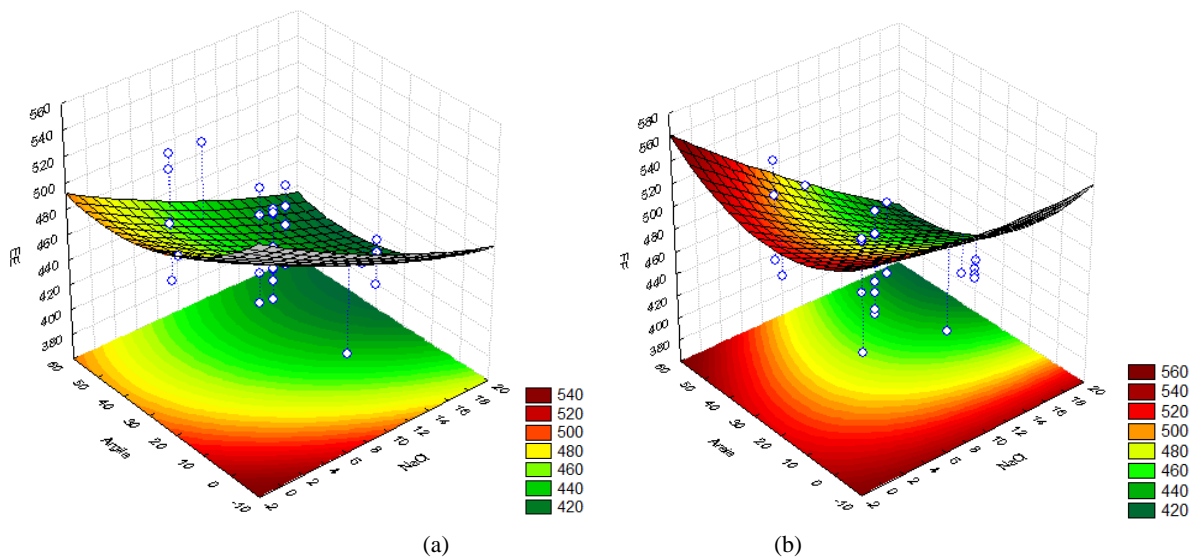


Figura 5 - Superfícies de resposta para estabilidade elétrica fixando (a) no nível -1 areia e carbonato de cálcio e (b) no nível +1 argila e carbonato de cálcio

## Conclusões

Com o objetivo de estudar os efeitos da incorporação conjunta de diferentes sólidos nas propriedades de densidade, reologia e estabilidade elétrica de fluidos de perfuração olefinicos por meio de um planejamento experimental com configuração estrela, concluiu-se que:

- A partir dos modelos matemáticos obtidos, a contaminação conjunta dos sólidos foi estatisticamente significativa para a densidade, a viscosidade plástica e a estabilidade elétrica, ao nível de 90% de confiança;
- Através da análise das superfícies de resposta, a contaminação dos sólidos, isoladamente ou em conjunto, influenciou todas as propriedades estudadas, com uma maior tendência para a influência em maiores concentrações. Sendo a argila responsável por maiores influências na força gel e o NaCl responsável por maiores influências na viscosidade plástica e na estabilidade elétrica.

De modo geral, os sólidos incorporados em altos teores aos fluidos de perfuração olefinicos agem como contaminantes, aumentando a densidades, viscosidade plástica, limite de escoamento e força gel, e reduzindo a estabilidade elétrica.

## Agradecimentos

Ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEMat), ao CNPq pelo apoio financeiro e à PETROBRAS pelo apoio à pesquisa.

## Referências

- [1] Silva, C. H. Influência da incorporação de sólidos nas propriedades de fluidos de perfuração sintéticos. 2014. 80f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
- [2] Buckley, J. S. Morrow, N. R. Wettability and Prediction of Oil Recovery from Reservoirs Developed with Modern Drilling and Completion Fluids. New Mexico Institute of Mining and Technology, 2006.
- [3] Njobuenwu D. O. & Wobo, C. A. Effect of drilled solids on drilling rate and performance. Journal of Petroleum Science and Engineering. v.55, 271– 276, 2007.
- [4] Caenn, R.; Darley, H.C.H.; Gray, G.R. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. 6 ed.

Waltham, Ma –USA: Gulf Professional Publishing, 2011.

- [5] STATSOFT, Inc. Statistica for Windows, version 7.0, 2000.
- [6] Rodrigues, M. I., Iema, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2ª Edição. Campinas: Cárita; 2010
- [7] Barros Neto, B.; Scarminio, I.S.; Bruns, R.E. Planejamento e otimização de experimentos. Editora da UNICAMP. São Paulo. 1996.
- [8] Machado, J. C. V. Reologia e escoamento de fluidos – Ênfase na indústria do petróleo. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2002.
- [9] Perez, G. R. M., C. H. Estudo da estabilidade elétrica de fluidos de emulsão inversa usados para perfuração de poços de petróleo. 2008. 48f. Monografia (Graduação em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.