

Influência das variáveis: temperatura e tempo de envelhecimento nas propriedades reológicas dos fluidos argilosos através do planejamento experimental

S. S. L. Oliveira^{1*}, L. V. Amorim²

¹Graduando em Engenharia de Materiais, Bolsista PRH-25/ANP/UFCG

²Departamento de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Campina Grande

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

(Recebido em 30/06/2015; revisado em 29/10/2015; aceito em 30/10/2015)

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

Resumo:

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência das variáveis: tempo de envelhecimento e da temperatura nas propriedades reológicas dos fluidos argilosos, utilizando planejamento fatorial do tipo 2^3 com três experimentos no ponto central. Foram estudados os tempos de envelhecimento de 1, 8 e 15 dias e as temperaturas de 40, 60 e 80 ° C para a realização dos ensaios. Os fluidos foram preparados com concentração de 30g de argila Brasgel PA/350mL de água e uma parte foi aditivada com 0,5g de MgO - controlador de pH. 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 presença do MgO, aumentando os valores das propriedades reológicas dos fluidos. A temperatura de ensaio foi a variável que apresentou maior influência sobre as propriedades dos fluidos.

Palavras-chave: Planejamento experimental; temperatura; tempo de envelhecimento; fluidos argilosos.

Abstract:

The aim of this work is to evaluate the influence of the variables: aging time and temperature on rheological properties of clay fluids, using a factorial plan 2^3 type with three experiments in the central point. Were studied the aging times of 1, 8 and 15 days and temperatures of 40, 60 and 80 ° C for testing. The fluids were prepared with concentration of 30g clay Brasgel PA / 350mL water and a part additivated with 0.5g of MgO - pH controller. The viscosities were determined on viscometer Fann 35A. From the results of experimental data regression it was observed that the values of apparent and plastic viscosities change with the presence of MgO, increasing the values of the rheological properties of fluids. The test temperature was the variable that conferred great influence in the fluid properties.

Keywords: Experimental plan; temperature; aging time; clay fluids.

1. Introdução

No contexto da exploração de petróleo, o processo de perfuração de poços se apresenta como um dos mais complexos e primordiais para o sucesso de toda a cadeia de operações que constitui a indústria de petróleo, já que o poço caracteriza-se como meio de ligação entre a superfície e o reservatório, onde é encontrado o hidrocarboneto [1].

Os fluidos de perfuração, também chamados de lamas, são empregados para auxiliar o processo de perfuração de poços. Diversos tipos de fluidos de perfuração são utilizados, podendo-se destacar os fluidos à base de água e argila [2].

Os fluidos de perfuração argilosos foram um dos primeiros a serem utilizados pela indústria do petróleo e gás e são, ainda hoje, amplamente empregados, pois além do seu caráter ambientalmente correto, apresentam custo muitas vezes inferior aos demais tipos de fluidos. A principal matéria prima desse tipo de fluido são as argilas bentoníticas sódicas.

O emprego deste tipo de fluido se limita às primeiras fases da perfuração de poços (comumente fases I e II, caracterizadas pelos revestimentos condutor e de superfície, respectivamente), nas quais são geralmente encontradas formações de fácil perfuração [3].

Dentre os desafios encontrados na perfuração de poços profundos, destacam-se as elevadas temperatura e pressão no fundo do poço; à medida que aumenta a profundidade, a temperatura na parte inferior do poço aumenta. Isto ocorre porque o núcleo da terra é mais quente do que a crosta e o fluxo de calor é contínuo do centro para a superfície [4].

Atualmente, as perfurações de poços de petróleo têm atingido regiões cada vez mais profundas e complexas. Como consequência, os fluidos de perfuração, indispensáveis à operação, são submetidos a condições severas de temperatura, bem como longos períodos de tempo sem circulação. Aliado aos fatores citados e devido ao grande número de variáveis envolvidas durante as operações de perfuração e as rigorosas

*Email: sandriely_sonaly@hotmail.com (S. S. L. Oliveira)

exigências ambientais, estudar e compreender o comportamento reológico de fluidos aquosos a elevadas temperaturas e desenvolver fluidos de perfuração estáveis termicamente é atualmente um grande desafio.

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 [3].

Diante do exposto, este trabalho objetiva avaliar a influência das variáveis de entrada: tempo de envelhecimento e da temperatura nas propriedades reológicas dos fluidos argilosos.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

Para a preparação dos fluidos foram utilizados: uma argila bentonítica sódica industrializada, denominada de Brasgel PA; e uma amostra de MgO, utilizado como controlador de pH.

2.1. Métodos

A análise química da amostra de argila industrializada foi realizada segundo os métodos clássicos no Laboratório de Caracterizações de Materiais do DEMa/CCT/UFMG.

Os difratogramas de DRX foram obtidos em um aparelho da marca Shimadzu XRD-6000, utilizando-se radiação $K\alpha$ do cobre ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$), tensão de 40KV, corrente de 30mA, varredura entre 2θ de 2° a 30° e velocidade de varredura de $2^\circ/\text{min}$.

Para avaliar a influência das variáveis de entrada (tempo de envelhecimento e temperatura) sobre as propriedades reológicas (viscosidade plástica e aparente), foi utilizado um planejamento fatorial do tipo 2^2 com três experimentos no ponto central, totalizando 7 corridas experimentais [5]. A regressão dos dados experimentais foi realizada utilizando o software STATISTICA (STATSOFT), versão 7.0 [6]. 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.

Foram preparados no total 14 fluidos, formulados com 20 g de argila Brasgel PA/350 mL de água deionizada, sem e com 0,5g de MgO/350 mL de água deionizada.

Os níveis codificados e os valores reais das variáveis de entrada empregados no planejamento encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Valores codificados e reais das variáveis de entrada

Níveis codificados	Níveis codificados		
	-1	0	+1
Tempo de Envelhecimento (dias)	1	8	15
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	40	60	80

Para a preparação dos fluidos, a argila foi adicionada à água deionizada a uma velocidade de 17.000 rpm em um

agitador *Hamilton Beach*, modelo 936, sob agitação constante por 20 min.

Para os fluidos aditivados com MgO, primeiramente, adicionou a argila à água, que permaneceu sob agitação durante 5 min, em seguida foi adicionado o MgO que permaneceu sob agitação constante por 15 min, até completar o tempo total de 20 min. Após esse tempo, os fluidos preparados foram transferidos para recipientes fechados. Os fluidos foram preparados em duplicatas.

Os fluidos de perfuração foram envelhecidos em tempos pré-definidos. Os fluidos permaneceram em recipiente fechado durante o período de 1, 8 e 15 dias a temperatura ambiente.

Após o envelhecimento, foi realizado o estudo reológico dos fluidos de perfuração. Para isso, o fluido foi agitado durante 5 min 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 nas velocidades de 600 rpm, 300 rpm, 200 rpm, 100 rpm, 6 rpm e 3 rpm e efetuada a leitura de cada velocidade de acordo com a norma API (2005).

Com os dados das leituras obtidas no viscosímetro, foram calculadas a viscosidade aparente (VA) e a viscosidade plástica (VP), limite de escoamento (LE) e a força gel (FG) segundo a norma API [7], e conforme as equações 1, 2, 3 e 4 abaixo:

- Viscosidade aparente (VA):

$$VA = \frac{L_{600}}{2} (cP) \quad (1)$$

- Viscosidade plástica (VP):

$$VP = L_{600} - L_{300} (cP) \quad (2)$$

- Limite de escoamento (LE):

$$LE = L_{300} - VP (N/m^2) \quad (3)$$

- Força gel:

$$FG = (G_f - G_i) (N/m^2) \quad (4)$$

Os valores de gel inicial (G_i) e gel final (G_f) relacionam a velocidade de formação e rigidez dos géis formados. O gel inicial mede a força do gel após dez segundos de repouso do fluido, e o gel final após dez minutos. Esses valores caracterizam a capacidade do fluido de sustentar os cascalhos formados e é denominada de força gel. E para determinar os valores de pH foi utilizado Phmetro digital da marca Gehaka

3. Resultados e Discussão

A composição química da argila Brasgel PA é apresentada na Tabela 2.

A amostra apresentou composição química típica de argilas bentônicas com teores de Fe₂O₃ de 10,59%. O alto teor de Fe₂O₃ apresentado pela Brasgel PA é típico de argilas regionais da Paraíba. Em relação aos teores de Na₂O, a argila Brasgel PA apresentou valor de 2,26%, sendo este valor bem considerado. Este valor deve-se muito provavelmente ao processo de aditivação, uma vez que a argila Brasgel PA, sendo proveniente das jazidas de bentonita de Boa Vista, PB, é naturalmente policatiônica e, portanto, transformada em sódica por meio de aditivação com carbonato de sódio ou barrilha.

A amostra apresentou 2,66 % de MgO e para Amorim [2] este óxido implica no aumento da viscosidade aparente, uma

vez que o magnésio confere às dispersões estado parcialmente floculado. Esta aditivação, além do acréscimo na viscosidade aparente, proporciona pequena queda na viscosidade plástica.

Através do difratograma de raios X (Figura 1) observam-se: pico a 13,78 Å com mudança para 16,51 Å, para a amostra tratada com etileno glicol, característico da presença de argilomineral do grupo da esmectita; bandas entre 4,45 Å (caulinita) e 4,23 Å (quartzo), com sobreposição de picos, característicos da presença de argilomineral do grupo da esmectita, provavelmente montmorilonita ou membro da série nontronita-beidélita, e pico a 3,30 Å, característico da presença do quartzo.

Nas Tabela 3 e Tabela 4 encontram-se a matriz de planejamento fatorial e os resultados das viscosidades aparente (VA) e plástica (VP), limite de escoamento (LE), força gel (FG) e do pH dos fluidos argilosos sem aditivação e dos fluidos aditivados com MgO, respectivamente.

Tabela 2. Composição química da Brasgel PA

Amostra	Determinações (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	CaO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂
Brasgel PA	62,83	18,24	10,59	2,66	2,26	1,42	0,28	0,42	0,87

Tabela 3. Matriz de planejamento fatorial, propriedades reológicas (VA, VP, LE e FG) e pH dos fluidos argilosos com 20 g de argila Brasgel PA e sem aditivação de MgO

Experimentos	Tempo de envelhecimento	Temperatura	VP (cP)	VA (cP)	LE (N/m ²)	FG (n/m ²)	pH
E1 (1 dia/40°C)	-1	-1	8	27	19	3	9,78
E2 (15 dias/40°C)	+1	-1	9	26,5	17,5	1	9,35
E3 (1 dia/80°C)	-1	+1	7	26	19	5	9,67
E4 (15 dias/80°C)	+1	+1	6	25	19	8	9,51
E5 (8 dias/60°C)	0	0	8	26	18	6	9,5
E6 (8 dias/60°C)	0	0	7	25,5	18,5	4	9,49
E7 (8 dias/60°C)	0	0	7	26	19	4	9,5

Tabela 4. Matriz de planejamento fatorial, propriedades reológicas (VA, VP, LE e FG) e pH dos fluidos argilosos com 20 g de argila Brasgel PA e aditivados com MgO

Experimentos	Tempo de envelhecimento	Temperatura	VP (cP)	VA (cP)	LE (N/m ²)	FG (N/m ²)	pH
E1 (1 dia/40°C)	-1	-1	9	27	36	7	9,67
E2 (15 dias/40°C)	+1	-1	9	27	36	3	9,60
E3 (1 dia/80°C)	-1	+1	7	31,5	49	1	9,92
E4 (15 dias/80°C)	+1	+1	7	30,5	47	3	9,55
E5 (8 dias/60°C)	0	0	8	29	42	2	9,54
E6 (8 dias/60°C)	0	0	9	29,5	41	3	9,62
E7 (8 dias/60°C)	0	0	9	29,5	41	1	9,55

Por meio dos resultados apresentados na Tabela 3, reológicas dos fluidos submetidos a diferentes tempos de observou-se uma pequena variação das propriedades envelhecimento e ensaiados a diferentes temperaturas. Esta

variação é de apenas 1,0 cP e, por isto, considera-se que os fluidos apresentaram valores praticamente constantes. Este comportamento deve-se a total hidratação e dispersão das partículas de argila em meio aquoso no período de 24 horas, ou seja, até 1 dia de envelhecimento. A total hidratação das partículas de argila promove melhores resultados de viscosidades, uma vez que as partículas tendem a se manter afastadas umas das outras por repulsão eletrostática. Comportamento semelhante também foi observado para os valores de LE e FG.

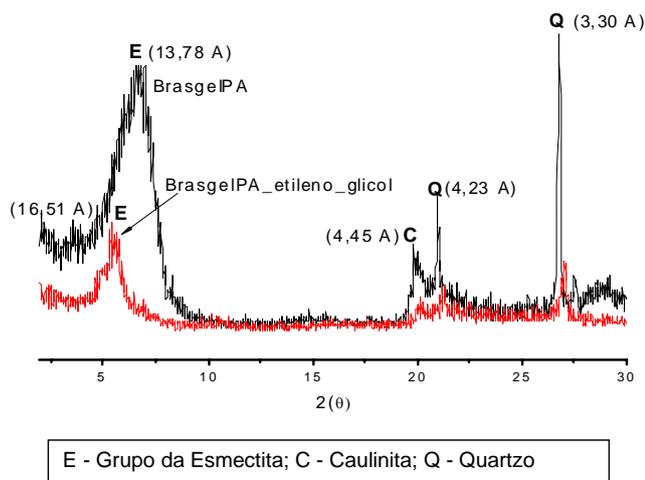


Figura 1. Difratograma da argila Brasgel PA com e sem tratamento de etileno glicol

É sabido que a temperatura pode afetar o equilíbrio eletroquímico das partículas de argila reduzindo o estado de

dispersão das mesmas e, conseqüentemente, provocando a floculação dessas partículas.

Duas características são essenciais para a estabilidade das dispersões de argila, o movimento Browniano, resultado da movimentação rápida, aleatória e desordenada das partículas de argila na fase dispersa; e o fenômeno de superfície das partículas, que tende a manter em suspensão as partículas de argila, de tal forma que são controladas as propriedades como viscosidade e velocidade de sedimentação. Esse fenômeno ocorre devido às interações eletrostáticas existentes entre elas, provenientes das interações repulsivas das superfícies das partículas [8].

Sabe-se que a temperatura aumenta o movimento Browniano das partículas no sistema, promovendo redução na interação molecular. No entanto, para os fluidos aditivados com MgO (Tabela 4), o aumento do movimento Browniano, favorece a maior interação do íon Mg^{2+} com as partículas de argila dispersas no meio. Isto porque, o íon Mg^{2+} aumenta a densidade de cargas positivas no meio, diminuindo as forças de repulsão. Como resultado, há uma aproximação das partículas de argila, formando flocos, aumentando assim a viscosidade. O sistema, muito provavelmente, encontra-se em estado floculado e disperso que é caracterizado pelo aumento nos valores de VA e redução nos valores de VP.

Todos os valores de FG se encontram abaixo dos valores indicados para os fluidos utilizados em campo, que é entre 7 – 12 segundo Durand [9], e isto pode acarretar na decantação dos cascalhos no poço, o que leva a uma série de problemas, a exemplo de prisão de tubos.

Quanto ao pH dos fluidos, este ensaio não foi realizado sob temperatura, embora tenha sido medido para todos os experimentos realizados, como apresentado nas Tabelas 3 e 4. De forma geral, não foram observadas variações no pH dos fluidos. Todos os fluidos apresentaram valores próximos a 9,5, condição ideal para perfuração de poços.

Tabela 5. Análises de variância (ANOVA) e modelos matemáticos codificados da viscosidade aparente (VA), viscosidade plástica (VP), do limite de escoamento (LE) e da força gel (FG) dos fluidos com 20 g de argila e sem MgO para o planejamento fatorial empregado^a

Fonte de Variação	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	FG (N/m ²)
Coefficiente de correlação (R)	0,94	0,94	0,87	0,95
% de Variação Explicada	87,5	87,5	76,2	90,0
$F_{calculado}/F_{tabelado}$	0,75	0,75	0,35	0,97
Modelos matemáticos codificados para os fluidos preparados				
VA (cP) =	$26,0 \pm 0,12 - (0,38TE \pm 0,16) - (0,63 T \pm 0,16) - (0,13 TE.T \pm 0,16)$ (5)			
VP (cP) =	$7,4 \pm 0,18 + (0,0 TE \pm 0,24) - (1,0 T \pm 0,24) - (0,5 TE.T \pm 0,24)$ (6)			
LE (cP) =	$18,57 \pm 0,16 - (0,37TE \pm 0,21) - (0,37 T \pm 0,21) - (0,37 TE.T \pm 0,21)$ (7)			
FG (cP) =	$4,43 \pm 0,38 + (0,25 TE \pm 0,5) + (2,25 T \pm 0,5) + (1,25 TE.T \pm 0,5)$ (8)			

^a Os valores em negrito das equações são os parâmetros estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança, TE o tempo de envelhecimento e T a temperatura do ensaio.

Após a análise das propriedades reológicas, utilizando a ferramenta estatística, foi possível investigar, por meios matemáticos, a influência das variáveis de entrada (tempo de envelhecimento e temperatura) nas propriedades VA, VP, LE e FG dos fluidos argilosos, representados nas Tabelas 5 e 6.

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% [10].

Verificou-se que o ajuste do modelo foi satisfatório, com coeficientes de correlação de 0,94, 0,94, 0,87 e 0,95 e percentagens de variância explicada de 87,5%, 87,5%, 76,2% e 90% para VA, VP, LE e FG, respectivamente para os fluidos sem MgO. E com coeficientes de correlação de 0,99, 0,86, 0,99, 0,87 percentagens de variância explicada de 97,9%, 73,7%, 99,0% e 76,4 % para os fluidos com MgO.

A percentagem de variação explicada quantifica a qualidade do ajustamento, variando de 0 a 100%, e o teste F (razão entre o Fcalculado e o Ftabelado) quando superior a 1 representa uma regressão estatisticamente significativa e quando superior a 5, uma regressão estatisticamente significativa e preditiva. De acordo com Rodrigues [10], o teste F mostra se há relação entre as variáveis dependentes

(VA, VP, LE e FG) e independentes (tempo de envelhecimento e temperatura).

Por meio da análise de variância da Tabela 5, verificou-se que a razão entre o Fcalculado e o Ftabelado para todas as respostas foi menor que 1, não apresentando um modelo estatisticamente significativo ao nível de 95% de confiança.

O teste F (Tabela 6) mostrou que a razão entre o Fcalculado e o Ftabelado para as respostas (VA e LE) foi superior a 5, com 95% de confiança, o que mostra que os modelos foram bem ajustados, sendo estes estatisticamente significativos e preditivos. Já para as respostas (VP e FG) a razão entre o Fcalculado e o Ftabelado foi menor que 1, não apresentando um modelo estatisticamente significativo ao nível de 95% de confiança.

Tabela 6. Análises de variância (ANOVA) e modelos matemáticos codificados da viscosidade aparente (VA), viscosidade plástica (VP), do limite de escoamento (LE) e da força gel (FG) dos fluidos com 20 g de argila e com MgO para o planejamento fatorial empregado^a

Fonte de Variação	VA (cP)	VP (cP)	LE (N/m ²)	FG (N/m ²)
Coefficiente de correlação (R)	0,99	0,86	0,99	0,87
% de Variação Explicada	97,9	73,7	99,0	76,4
F _{calculado} /F _{tabelado}	5,0	0,30	11,01	0,35
Modelos matemáticos codificados para os fluidos preparados				
VA (cP) = 29,14 ± 0,13 - (0,25TE ± 0,17) + (2,0 T ± 0,17) - (0,25 TE.T ± 0,17)	(9)			
VP (cP) = 8,2±0,26 + (0,0TE ± 0,34) - (1,0T ± 0,34) + (0,0 TE.T ± 0,34)	(10)			
LE (cP) = 41,72 ± 0,26 - (0,5TE ± 0,35) + (6,0 T ± 0,35) - (0,5 TE.T ± 0,35)	(11)			
FG (cP) = 2,86 ± 0,53 - (0,5TE ± 0,7) - (1,5T ± 0,7) + (1,5 TE.T ± 0,7)	(12)			

^a Os valores em negrito das equações são os parâmetros estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança, TE o tempo de envelhecimento e T a temperatura do ensaio.

As Equações de 5 a 12 apresentam os modelos matemáticos empíricos, codificados, com os seus respectivos parâmetros estatísticos e desvios padrão para a VA, VP, LE e FG dos fluidos preparados com 20 g de argila Brasgel PA, sem MgO (equações 5, 6, 7 e 8) e com MgO (equações 9, 10, 11 e 12). Os modelos foram obtidos a partir da regressão linear dos dados experimentais utilizando o Software Statistica, versão 7.0 [6].

Os valores em negrito das equações são os parâmetros estatisticamente significativos, sendo TE o tempo de envelhecimento e T a temperatura.

A análise dos efeitos principais (TE e T) e a interação entre eles (TE.T) para a viscosidade aparente (VA) e plástica (VP) indicou que apenas a temperatura (T) têm influência estatisticamente significativa, ao nível de 95% de confiança, nas propriedades estudadas. Com exceção de VP e LE para os fluidos com MgO, e da LE para os fluidos sem MgO que não apresentaram nenhuma influência significativa das variáveis em estudo.

Nas Figuras 2 e 3 estão apresentadas as superfícies de resposta para as propriedades reológicas dos fluidos argilosos com 20g de argila Brasgel PA sem e com MgO, respectivamente. Essas superfícies foram geradas a partir das equações de 5 a 12.

O aumento da temperatura conduziu a uma leve alteração nos valores de LE, mantendo-se praticamente constante

durante todo o estudo, e por isto não contribui estatisticamente para o aumento ou redução desta propriedade. Comprovando mais uma vez, que apenas a temperatura influência de forma estatisticamente significativa às propriedades reológicas, com exceção do LE; esta afirmação pode ser comprovada pelas superfícies de resposta (Figura 2) e pela equação 7

Conclui-se que as propriedades reológicas (VA, VP, LE e FG) independem do tempo de envelhecimento e da interação entre tempo e temperatura estando apenas relacionada com a temperatura.

Como já observado pelos valores pontuais, a superfície de resposta (Figura 3) para a VA e LE dos fluidos com MgO indica que a temperatura de ensaio é o parâmetro que influenciada essa propriedade, sendo obtidos maiores valores de VA e de LE quando a temperatura passa do nível -1 para +1. O tempo de envelhecimento e a interação entre as variáveis tempo e temperatura não conduzem a variações nessas duas propriedades do fluido.

As propriedades VP e FG não sofreram influencia de forma estatisticamente significativa em relação às variáveis de entrada, de tal forma que as propriedades reológicas independem do tempo de envelhecimento, da temperatura e da interação entre tempo e temperatura.

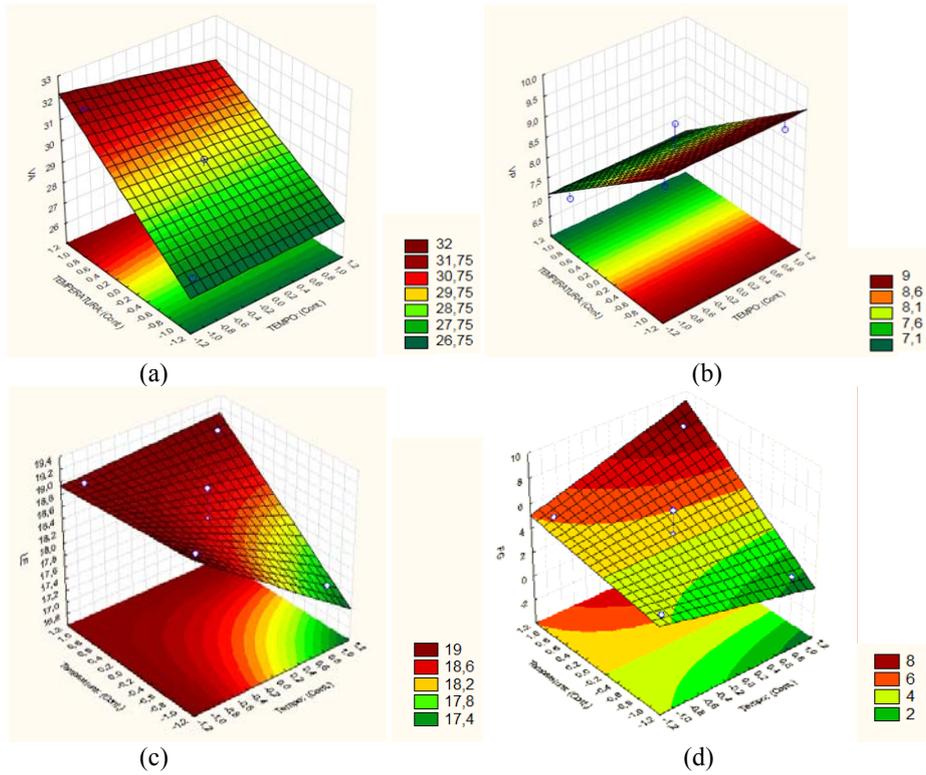


Figura 2. Superfície de resposta para (a) viscosidade aparente (VA), (b) viscosidade plástica (VP), (C) limite de escoamento (LE) e (d) força gel (FG) dos fluidos preparados com 20 g de argila e sem a adição de MgO

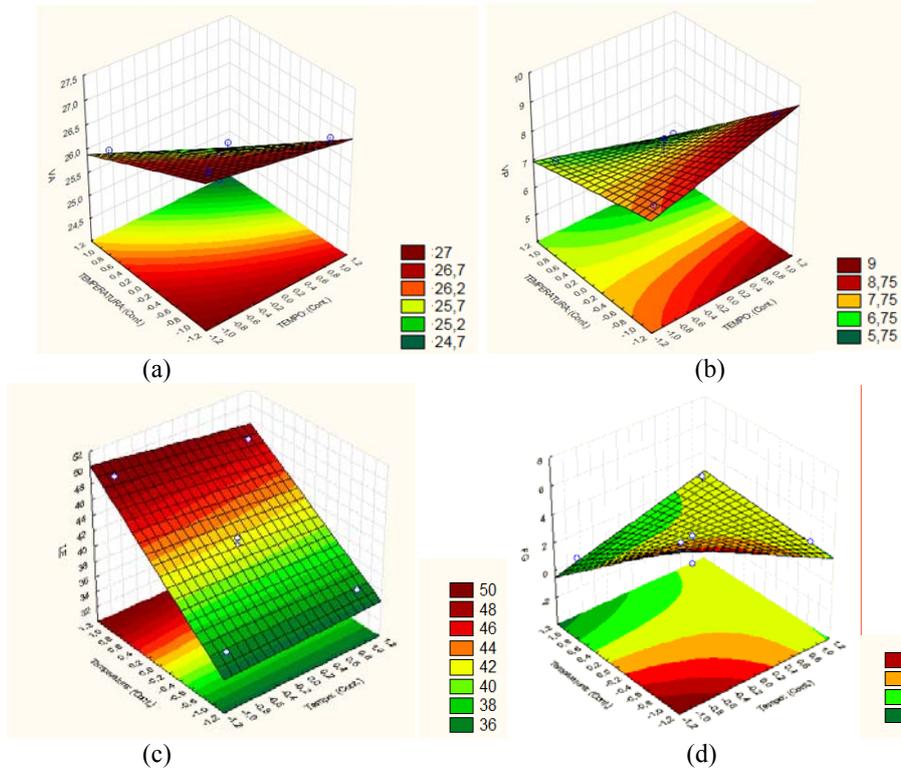


Figura 3. Superfície de resposta para (a) viscosidade aparente (VA), (b) viscosidade plástica (VP), (C) limite de escoamento (LE) e (d) força gel (FG) dos fluidos preparados com 20 g de argila e com a adição de MgO

4. Conclusões

Após utilizar o planejamento experimental para estudar a influência das variáveis de entrada: temperatura e tempo de envelhecimento no comportamento reológico dos fluidos argilosos, conclui-se que:

- As viscosidades aparente e plástica, o limite de escoamento e a força gel são variáveis independentes, estatisticamente significativas ao nível de 95,0 % de confiança, do tempo de envelhecimento e da interação entre tempo de envelhecimento e temperatura;
- O aumento da temperatura provocou mudanças mais significativas nas propriedades estudadas, em que este aumento favoreceu a maiores valores de VP e LE.

Não foram observadas variações significativas no pH dos fluidos com aumento do tempo de envelhecimento, da temperatura, e na presença do controlador de pH. Todos apresentaram valores que oferecem condições ideais para perfuração de poços

Referências

- [1] Medeiros, B. E. A., Barros Neto, E. L. E Neto, A. A. D. Efeito de viscosificantes e redutores de filtrados na filtração de fluidos de perfuração à base água [Plano de Trabalho de Pesquisa ANP]. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2008.
- [2] Amorim, L. V. Melhoria, proteção e recuperação da reologia de fluidos hidroargilosos para uso na perfuração de poços de petróleo [tese de doutorado]. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande; 2003.
- [3] Thomas, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo. Rio de Janeiro: Interciência; 2001.
- [4] Larsen, H. Behaviour of polymer muds under high pressure – high temperature conditions [dissertation]. Trondheim: Faculty of Engineering and Technology; 2007.
- [5] Neto, E. T., Neto, A. A. T. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. Química Nova, 32 (3), 809-817, 2009.
- [6] Statsoft, Inc. Statistica for Windows, version 7.0, 2000.
- [7] API. Petroleum and natural gas industries - Field testing of drilling fluids - Part 1: Water-based fluids, ISO/WD 10414-1 e ISO TC 67/SC 3 N, 2005.
- [8] Darley, H. C. H., Gray, G. R., Caenn, R. Composition and properties of drilling and completion fluids. Sixth Edition. Texas: Gulf Publishing Company; 2011.
- [9] Durand, C., Forsans T. Influence of clays on borehole stability: A literature survey. part two: mechanical description and modelling of clays and shales. Revue de L'Institute Français du Pétrole, 50 (3), 353-380, 1995.
- [10] Rodrigues, M. I., Iema, A. F. Planejamento de experimentos e otimização de processos. 2ª Edição. Campinas: Cárita; 2010.