

POTENCIAL APLICAÇÃO DO PÓ DE SERRAGEM COMO ADITIVO PARA CONTROLE DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS E DE FILTRAÇÃO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO AQUOSOS

Joyce da Silva Bandeira¹
Fabio Pereira Fagundes²
Kilton Renan Alves Pereira³
Keila Regina Santana Fagundes⁴

RESUMO

O controle das propriedades dos fluidos de perfuração é essencial, principalmente, quando este atravessa zonas com formações inconsolidadas. Essas propriedades incluem densidade do fluido e parâmetros reológicos (viscosidade e tensão limite de escoamento). Por essa razão, torna-se um desafio-chave encontrar novos aditivos alternativos capazes de promover um sinergismo entre as propriedades reológicas e de filtração dos fluidos, de forma a reduzir os custos operacionais da perfuração. Nesse contexto, tem aumentado o interesse pelo reaproveitamento de resíduos diversos para aplicação nos fluidos. O pó de serragem, especificamente, apresenta como única opção de uso, sua queima ou descarte. Do ponto de vista técnico, é um material orgânico de composição complexa, onde predominam as fibras de celulose e hemicelulose, onde apresentam um forte caráter hidrofílico em função de sua orientação espacial. Uma combinação estratégica dos polímeros, com ajuste de granulometria do pó de serragem pode, possivelmente, formular um fluido capaz de atender as situações mais diversas possíveis de perfuração. Por essa razão, o objetivo desse trabalho consiste em mapear por superfície de resposta a sinergia entre a granulometria do pó de serra, tipo do polímero e o obturante comercial frente às propriedades reológicas e de filtração dos fluidos de perfuração. Os resultados obtidos mostraram que a utilização do pó de serragem representa um potencial promissor frente aos novos redutores de filtrado, tendo em vista seu baixo custo e conferir excelentes propriedades reológicas aos fluidos de perfuração aquosos.

Palavras-chave: parâmetros reológicos, parâmetros de filtração, pó de serragem, fluidos de perfuração aquosos.

INTRODUÇÃO

A determinação das propriedades dos fluidos de perfuração é de fundamental importância no acompanhamento do fluido durante sua aplicação no poço. O controle das propriedades dos fluidos de perfuração é essencial, principalmente, quando este atravessa zonas com formações inconsolidadas. Essas propriedades incluem densidade do fluido e parâmetros reológicos (viscosidade e tensão limite de escoamento). Recentes pesquisas têm

¹ Graduando do Curso de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, johbandeira12.jb@gmail.com;

² Mestre em Engenharia de Petróleo, Universidade Potiguar - UnP, kiltonrenan90@gmail.com;

³ Pesquisador visitante PRH-55.1, Dr, Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, fabio.fagundes@ufersa.edu.br;

⁴ Professor orientador: Dr, Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, keilaregina@ufersa.edu.br.

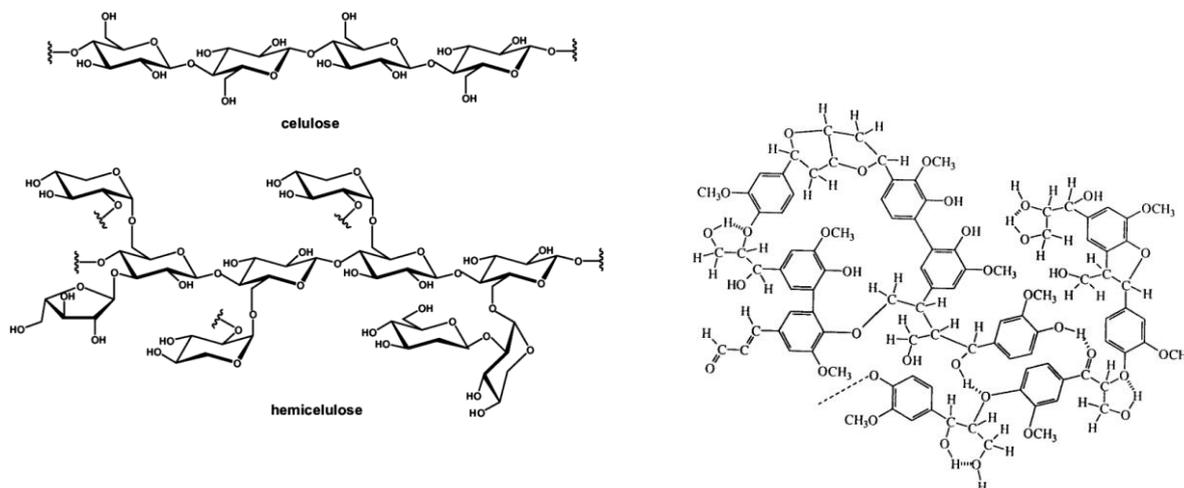
mostrado uma forte tendência de perfuração de poços de petróleo em lâminas d'água cada vez mais profundas (Yang et al (2013) e Chen et al (2018)). Em consequência disso, problemas associados às altas temperaturas e aos diferenciais de pressão são responsáveis por afetar diretamente a estabilidade dos poços de petróleo, especialmente, os relacionados às propriedades reológicas e ao controle de filtração dos fluidos.

A formação de entrelaçamentos entre as cadeias dos polímeros e as partículas sólidas (agente obturante) no fluido é responsável por gerar microestruturas reversíveis com mudanças na força gel dependendo da taxa de cisalhamento aplicada (fenômeno sol-gel) e assim, pode interferir definitivamente no processo de filtração desse fluido para a formação (Santana, 2014). As propriedades reológicas das soluções de hidroxipropilamido (HPA) têm sido muito bem documentadas na literatura, embora muitos aspectos dessas soluções ainda estejam no foco da pesquisa de polímeros e sejam objeto de uma grande quantidade de trabalho experimental e teórico. De forma geral, esse polímero em solução quando em baixas concentrações apresenta um comportamento predominantemente newtoniano, ao passo que, em concentrações mais altas, é responsável por assumir uma maior pseudoplasticidade, com características tixotrópicas e viscoelásticas, a depender obviamente, de sua massa molar, grau de substituição, concentração e sua interação com componentes presentes no sistema. É um polímero frequentemente utilizado na Engenharia de fluidos como um controlador de filtrado que em combinação com o agente obturante é capaz de promover uma redução da permeabilidade do reboco. Atualmente, a literatura tem relatado uma série de agentes obturantes e controladores reológicos capazes de proporcionar uma maior estabilidade aos fluidos de perfuração aquosos (Almeida et al (2020)). Por outro lado, em virtude de lâminas d'água cada vez mais profundas, se requer aditivos que possuam um menor custo de processamento e continuem promovendo um controle reológico e de filtração do fluido utilizado na perfuração.

Nesse contexto, o resíduo oriundo da serragem da madeira pode constituir um novo material a ser aplicado no fluido de forma a manter a estabilidade de suas propriedades reológicas e de filtração e conseqüentemente, a integridade do poço durante a perfuração. Percentualmente, a composição química do pó de serragem pode variar entre 40 a 50% de celulose, 20 a 30% de hemicelulose e 20 a 35% de lignina (Ver Figura 1). Além disso, podem estar presentes substâncias de baixa massa molar em menor quantidade, contudo, podem apresentar uma grande influência nas propriedades e na qualidade de processamento das

madeiras, tais como: compostos aromáticos (fenólicos), terpenos, ácidos alifáticos, álcoois, substâncias inorgânicas e outros elementos (MADEIDURA, 2015).

Figura 1 - Estrutura da celulose (A), monômeros formadores da hemicelulose (B) e estrutura da lignina (C)



Por essa razão, diante da necessidade de substituição de alguns aditivos presentes no fluido de perfuração e da geração em larga escala do pó de serragem, tornou-se um desafio-chave o emprego desse rejeito nos fluidos de perfuração de forma a manter ou melhorar as propriedades reológicas e de filtração já existentes. Tendo em vista a necessidade de formulações com menor custo e capazes de manter a estabilidade da perfuração em condições mais severas, a aplicação desse material constitui uma alternativa promissora frente à tecnologia de fluidos de perfuração inteligentes. Nesse contexto, o objetivo principal desse trabalho consiste em avaliar a inserção do pó de serragem em associação com os polímeros presentes no fluido, de forma a mapear por superfície de resposta (Software Statistica 10.0) a sinergia entre as variáveis de processo (Concentração de Hidroxipropilgumar e Concentração de pó de serragem) em função das variáveis resposta: L3, viscosidade aparente, viscosidade plástica, limite de escoamento e volume de filtrado.

METODOLOGIA

2.1 Materiais

Foi utilizado um resíduo de pó de serragem, oriundo de serrarias localizadas em Mossoró/RN. O material foi submetido a um processo de separação granulométrica em peneiras de 100 mesh, seguido de aquecimento à 80 °C para remoção da umidade.

Os materiais utilizados na preparação dos fluidos de perfuração foram gentilmente cedidos pela PETROBRAS: goma xantana (GX), hidroxipropilamido (HPA), cloreto de sódio (NaCl) e carbonato de cálcio (CaCO₃).

2.2 Preparação dos fluidos de perfuração

Os fluidos de perfuração aquosos foram preparados em um agitador Hamilton Beach, adicionando sequencialmente todos os aditivos. Os aditivos foram incorporados ao fluido em intervalos de 10 minutos, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. Todos os fluidos foram comparados a um fluido de referência, sem a utilização de pó de serragem e em presença de carbonato de cálcio (CaCO₃) na concentração de 20 lb/bbl.

Tabela 2 – Formulação dos fluidos de perfuração aquosos à base de pó de serragem.

Aditivos	Concentração (lb/bbl)
Água destilada	QSP
Goma xantana	1,5
HPA	1, 2, 3
NaCl	20
Pó de serragem	4, 6, 8
*Carbonato de cálcio	20 lb/bbl

*utilizado apenas no fluido de referência

2.3 Determinação das propriedades reológicas e de filtração dos fluidos

As propriedades reológicas foram determinadas em um viscosímetro rotativo da FANN, modelo 35 A, combinação de R1-B1 e mola de torção F1. O volume de filtrado dos fluidos foi determinado à temperatura ambiente (25 °C), utilizando-se um filtro API, Série 300 da Fann. Ambos os testes seguindo a norma API 13B. Com base em correlações matemáticas utilizadas na literatura foi possível determinar os seguintes parâmetros reológicos: Viscosidade aparente (mPa.s), Viscosidade plástica (mPa.s) e Limite de escoamento do fluido (lbf/100 ft²).

2.4 Mapeamento por Superfície de Resposta – MSR

Superfícies de respostas foram obtidas com base no planejamento fatorial completo do tipo 3², para examinar as interações e os efeitos causados pelas variáveis (fatores) concentração de HPA (lb/bbl) e concentração de pó de serragem (lb/bbl) nas propriedades reológicas e de filtração dos fluidos de perfuração aquosos (variáveis resposta), sendo os

valores dos fatores codificados para -1 (baixo), 0 (ponto central) e 1 (alto), conforme mostra a Tabela 2. O MSR foi obtido utilizando o programa Statistica versão 10.0.

Tabela 2 - Mapeamento por superfície de resposta da interação das variáveis de processo estudadas para os fluidos de perfuração aquosos em função das variáveis resposta: Viscosidade aparente (mPa.s), viscosidade plástica (mPa.s), volume de filtrado (mL) e L3.

Experimentos	Concentração de HPA (lb/bbl)	Concentração de pó de serragem (lb/bbl)	Variáveis resposta
1	1 (-1)	4 (-1)	Viscosidade aparente (cP), viscosidade plástica (cP), volume de filtrado (mL) e L3
2	1 (-1)	6 (0)	
3	1 (-1)	8 (1)	
4	2 (0)	4 (-1)	
5	2 (0)	6 (0)	
6	2 (0)	8 (1)	
7	3 (1)	4 (-1)	
8	3 (1)	6 (0)	
9	3 (1)	8 (1)	

Para cada variável resposta uma superfície foi obtida por um modelo quadrático com base na seguinte Equação 1 (BAGHEBAN SHAHRI; NIAZI; AKRAMI, 2018):

$$Y = b_0 + b_i x_i + b_j x_j + b_{ii} x_i^2 + b_{jj} x_j^2 + b_{ij} x_i x_j \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde: Y é a variável resposta; b_0 é o intercepto; b_i , b_{ij} and b_{ii} são os coeficientes de regressão linear, interação e quadrático, respectivamente; x_i e x_j são os valores codificados das variáveis concentração de HPA e concentração de pó de serragem. A análise da ANOVA foi aplicado para testar a significância dos modelos de regressão propostos, obedecendo à qualidade do ajuste expressa pelos coeficientes de determinação (R^2 e R^2_{ajustado}), os valores do teste *Fischer* e o valor probabilístico (valor-*p*) para um nível de confiança de 95% .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

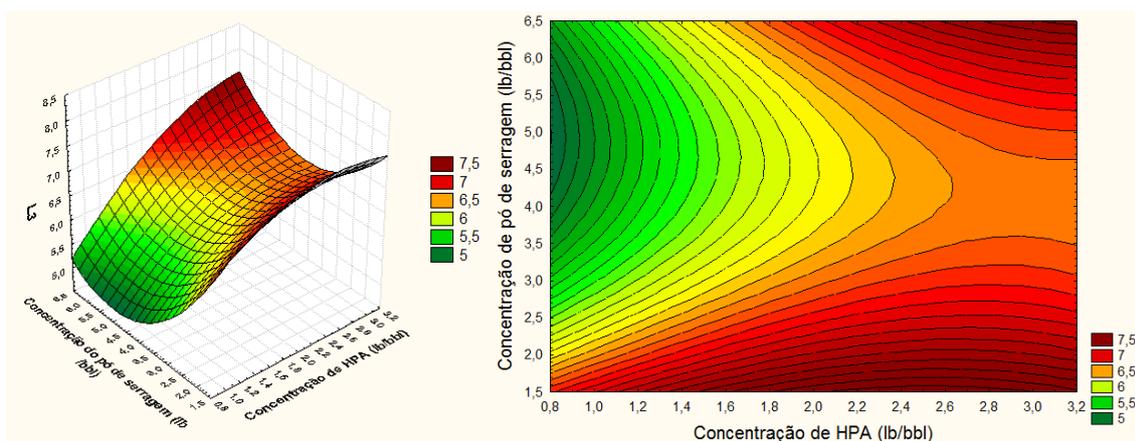
3.1 MSR em função do L3

A avaliação das propriedades reológicas é de das propriedades reológicas é de fundamental importância para o entendimento quanto ao escoamento do fluido de perfuração

no sistema, visto que, uma alta resistência ao escoamento pode comprometer o sistema de bombeamento do fluido e a estabilidade do poço. Da mesma forma, baixos valores de viscosidade podem proporcionar um sistema de carregamento e limpeza de poço ineficiente, o que possivelmente poderá vir a acarretar uma prisão de coluna. Dentre os vários parâmetros reológicos a serem avaliados, o L3 representa uma das propriedades que caracteriza a reologia dos fluidos em baixas taxas de cisalhamento, o que reflete a capacidade de carregamento e de sustentação dos cascalhos após uma parada das bombas. A Figura 2 mostra o MSR da interação entre a concentração de HPA versus concentração de pó de serragem, ambas em função do parâmetro L3.

Figura 2 - MSR da concentração de HPA (x) versus concentração de pó de serragem (y) em função do parâmetro L3 e respectiva equação para o modelo predito.

$$L3 = 7,8889 + 1,5x - 1,75y - 0,3333x^2 + 0,125xy + 0,1667y^2$$



De acordo com o MSR apresentado na Figura 2, fica evidenciado que a região de maior interesse é apresentada pela tonalidade mais escura, a qual representa os maiores valores de L3. Há duas regiões que refletem um maior incremento nos valores desse parâmetro. A primeira encontra-se na concentração de HPA entre 2,0 e 3,0 lb/bbl em associação com a menor concentração de pó de serragem utilizada no experimento. A segunda região reflete a maior concentração de HPA (2,6 – 3 lb/bbl) em associação com os maiores valores de concentração de pó de serragem (6 lb/bbl). Esse comportamento aparentemente anômalo pode estar associado à dispersão das partículas de serragem no meio, as quais em virtude do processo de adsorção dos polímeros na sua superfície, podem afetar diretamente o volume hidrodinâmico da molécula e com isso, influenciar no processo de tixotropia do fluido de perfuração. Além disso, ao comparar esse resultado ao fluido de referência, foi alcançado

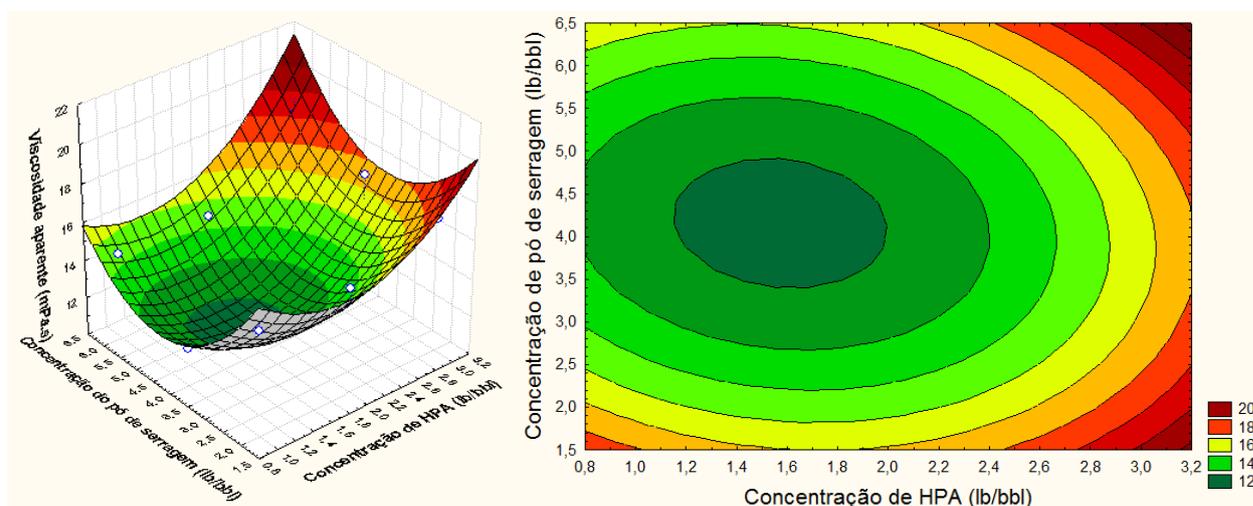
valores de L3 próximos ao fluido de referência, o qual possui uma concentração de CaCO₃ de 20 lb/bbl.

3.2 MSR em função da viscosidade aparente (mPa.s)

É importante controlar as propriedades reológicas do fluido visando aperfeiçoar a operação de perfuração, através da maximização da limpeza do poço, minimização da pressão de bombas, evitando o influxo da formação e prevenindo perda de circulação para a formação perfurada. Dessa forma, a avaliação da viscosidade aparente consiste em um dos principais parâmetros reológicos capazes de avaliar a dependência da resistência ao escoamento do fluido em função de cada cisalhamento aplicado. A Figura 3 mostra o MSR da interação entre as variáveis de processo e a viscosidade aparente (mPa.s).

Figura 3 - MSR da concentração de HPA (x) versus concentração de pó de serragem (y) em função do parâmetro viscosidade aparente e respectiva equação para o modelo predito..

$$\text{Viscosidade aparente (mPa.s)} = 29 - 7,3333x - 5,5833y + 2x^2 + 0,25xy + 0,625y^2$$



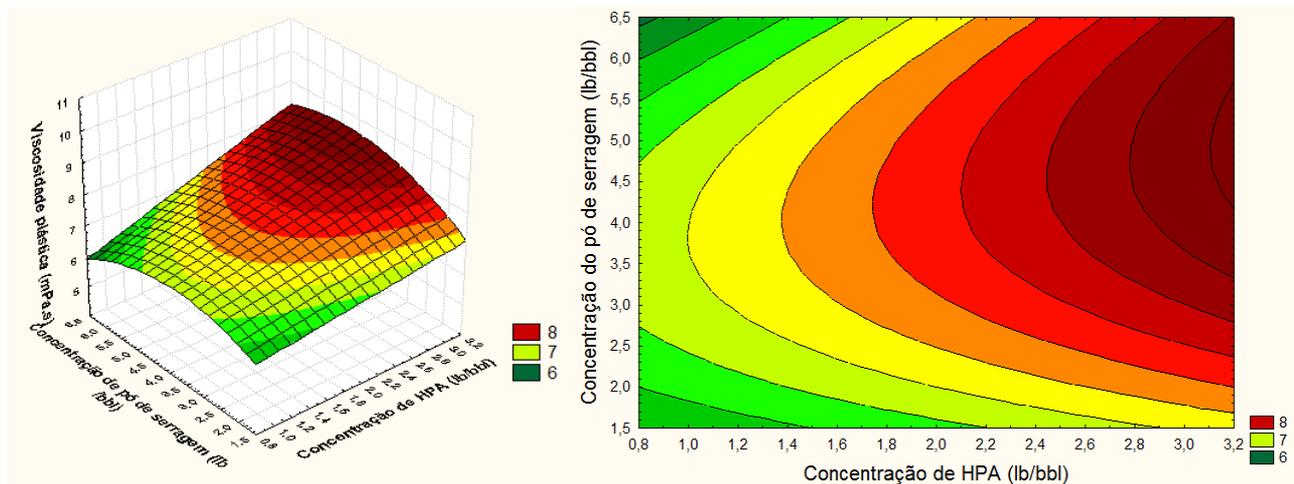
De acordo com os dados apresentados na Figura 3, fica evidenciada a região compreendida com maior concentração de pó de serragem (6 lb/bbl) em função da maior concentração de HPA (3 lb/bbl) para obtenção de valores de viscosidade aparente próximos a 20 mPa.s. A presença de grupamentos carboxílicos e hidroxilas dos polímeros de gomas xantana e HPA, respectivamente, é responsável por favorecer uma maior interação entre os sítios do pó de serragem e esses grupamentos, promovendo um aumento do volume hidrodinâmico da molécula e conseqüentemente, um aumento de viscosidade.

3.3 MSR em função da viscosidade plástica (mPa.s)

A viscosidade plástica (VP) de um fluido pode ser definida é definida como a medida da resistência interna do fluido ao escoamento, resultante da interação dos sólidos presentes, ou seja, a viscosidade plástica é uma medida da fricção resultante do choque das partículas entre si (Amorim, 2003). Por essa razão, o controle do teor de sólidos presentes nos fluidos de perfuração é de extrema importância, pois o seu aumento pode implicar na alteração direta de outras propriedades, tais como, densidade, viscosidade e força gel, além de aumentar a probabilidade de ocorrência de problemas como desgaste dos equipamentos de circulação, fratura das formações devido à elevação das pressões de bombeio ou hidrostática, prisão da coluna e redução da taxa de penetração. Valores de VP abaixo de 8 mPa.s não são adequados para fluidos de perfuração e é indicativo de que o LE está muito alto e isso pode levar a um estado de floculação para os sólidos presentes. Por outro lado, valores de VP muito acima de 10 mPa.s (alta viscosidade) pode gerar sobrecarga para o sistema de bombeamento de fluido, como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - MSR da concentração de HPA versus concentração de pó de serragem em função do parâmetro viscosidade plástica e respectiva equação para o modelo predito.

$$\text{Viscosidade plástica (mPa.s)} = 5 + 0,1667x + 0,8333y - 7,8965 \times 10^{-15}x + 0,125xy - 0,125y^2$$



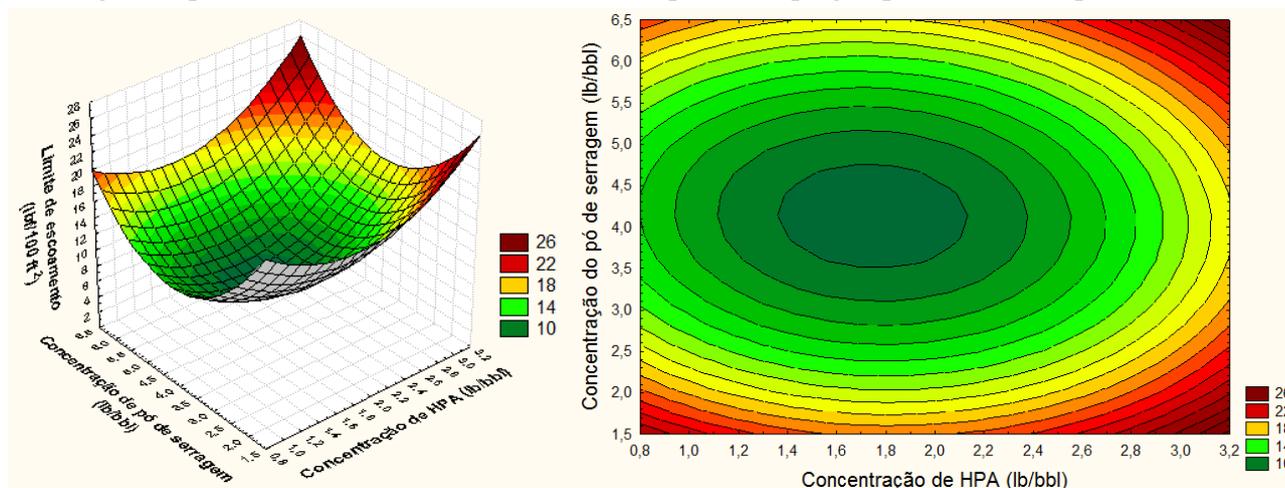
Conforme pode ser visualizado na Figura 4, a região de interesse encontra-se na faixa de concentrações de HPA acima de 2,2 lb/bbl associada a concentração do pó de serragem acima de 3 lb/bbl, fato esse, indicativo de valores de VP acima de 8 mPa.s. Esse resultado é extremamente interessante em virtude da concentração de obturante do fluido de referência, o qual utilizou 20 lb/bbl de CaCO₃ contra no máximo 6 lb/bbl. Isso implica na

redução da probabilidade de aparecimento de falhas no processo de perfuração, as quais foram apresentadas anteriormente.

3.4 MSR em função do limite de escoamento (mPa.s)

O limite de escoamento é uma variável de muita importância no entendimento do comportamento reológico dos fluidos de perfuração, o qual se refere ao valor mínimo de tensão cisalhante que deve ser aplicado ao fluido para que este inicie o escoamento. Também é considerado como uma medida das forças eletroquímicas ou de atração presentes no fluido, resultante das cargas positivas e negativas das superfícies das partículas. A Figura 5 mostra o MSR do limite de escoamento em função das variáveis de processo apresentadas.

Figura 5 - MSR da concentração de HPA (x) versus concentração de pó de serragem (y) em função do parâmetro limite de escoamento e respectiva equação para o modelo predito.



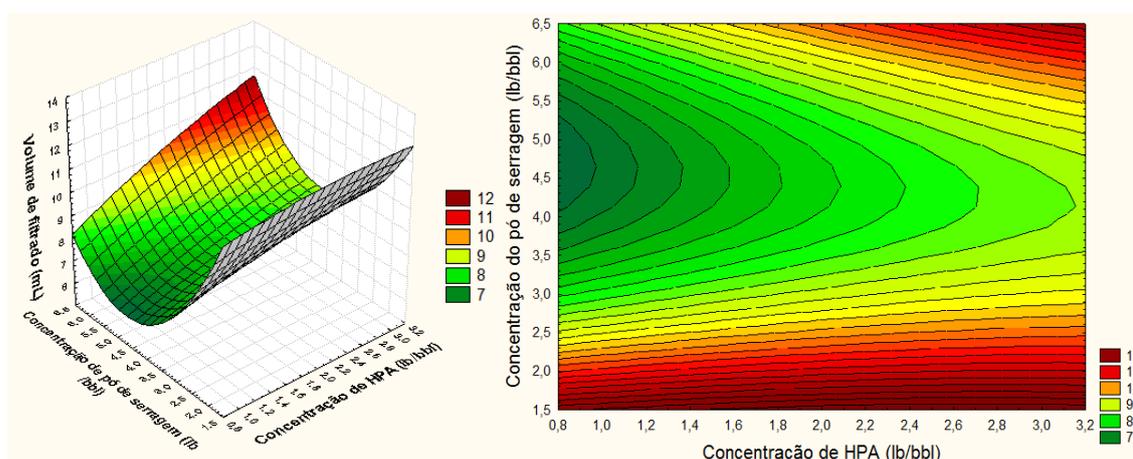
Conforme o MSR apresentado na Figura 5 fica evidenciado que o aumento da concentração de HPA foi responsável pelo aumento do limite de escoamento do fluido. Do ponto de vista operacional, é importante que esses valores não se sobreponham a 20 lbf/ft², em virtude da dificuldade em reiniciar um processo de circulação. Altos valores de LE são responsáveis por favorecer uma invasão do fluido de perfuração para a formação, aumento de torque da coluna, dificuldade na descida do revestimento e no processo de cimentação.

3.5 MSR em função do volume de filtrado (mL)

O volume de filtrado representa um dos principais parâmetros a serem avaliados em função da necessidade de entender como a permeabilidade do reboco irá influenciar o processo de difusão do fluido para o interior da formação. A perda de fluido para a formação deve ser constantemente monitorada, pois pode modificar importantes parâmetros como: estabilidade do poço, pressão diferencial, processos de recuperação, perda por circulação e causar danos a própria formação. A Figura 6 ilustra o MSR em função do volume do filtrado (mL) para os fluidos que contêm pó de serragem em sua formulação.

Figura 6 - MSR da concentração de HPA versus concentração de pó de serragem em função do parâmetro volume de filtrado (mL) e respectiva equação para o modelo predito.

$$\text{Volume de filtrado (mL)} = 18,7778 + 0,5x - 5,6667y - 0,1667x^2 + 0,25xy + 0,5833y^2$$



Fica evidenciado na Figura 6 que os menores valores de filtrado encontram-se na região compreendida entre 4,1 e 5,3 lb/bbl de pó de serragem e 1,0 e 1,4 lb/bbl de HPA. Esse material é constituído basicamente de macromoléculas como lignina, celulose, hemicelulose e proteínas, as quais possuem sítios adsorptivos, tais como grupos carbonilas, carboxilas, aminas, e hidroxilas, além de apresentarem alta área superficial e com tamanho de poros maiores, isso facilita a interação por ligações de hidrogênio com os polímeros presentes no fluido como goma xantana e HPA. Essa interação é responsável por promover a formação de um filme e consequentemente, favorecer a redução de permeabilidade. Entretanto, se faz necessário avaliar a razão ideal entre a concentração dessas variáveis de processo, o que possivelmente, justifica essa relação entre as concentrações apresentadas. Este comportamento ocorre, pois, no início, há uma grande quantidade de sítios livres para a adsorção do HPA e goma xantana na superfície da partícula. Com o decorrer do tempo, o número de sítios livres diminui e começa a haver também a presença de forças repulsivas das moléculas dos polímeros (HPA e

goma xantana), o que dificulta o processo de adsorção nos sítios e assim, contribui para uma maior permeabilidade.

3.6 Análise da ANOVA

O teste de variância (ANOVA) aplicado aos modelos de regressão mostraram que apenas a variável resposta viscosidade aparente apresentou efeitos significativos para os modelos quadráticos em relação as concentrações de HPA e pó de serragem (PS), conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Teste da ANOVA para variável resposta viscosidade aparente em função das concentrações de HPA e PS para intervalo de confiança de 95%.

Fator	SS	gl	MS	F	valor-p
(1)HPA (L)	16,67	1	16,66667	10,7143	0,046662*
HPA (Q)	8,00	1	8,00000	5,14286	0,108146
(2)PS (L)	0,17	1	0,16667	0,10714	0,764931
PS (Q)	12,50	1	12,5000	8,03571	0,065932
1L by 2L	1,00	1	1,0000	0,64286	0,481309
Erro	4,67	3	1,55556		
Total SS	43,00	8			
R ²	0,8915				
R ² _{ajustado}	0,7106				

*valor-p < 0,05 indica que o termo é significativo para o modelo.

A Tabela 3 mostra que o efeito da concentração de HPA em termo linear foi significativo para nível de significância de 5% (valor-p \approx 0,047), sendo os demais fatores e sua interação não significativos, pelo valor-p superior a 0,05. Os valores obtidos para os coeficientes de correlação (R² e R²_{ajustado}) mostraram nível superior a 71% da variação dos valores pode ser explicado pelo modelo proposto.

Com base nisso, é possível obter uma formulação do fluido de perfuração base água com uma faixa de concentração de pó de serragem superior, já que para as condições estudadas não ocorreu uma significância estatística para as variáveis resposta investigadas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- A presença de grupamentos carboxílicos e hidroxilas dos polímeros goma xantana e HPA, respectivamente, é responsável por favorecer uma maior interação entre os sítios do pó de serragem e esses grupamentos, promovendo um aumento do volume hidrodinâmico da molécula e conseqüentemente, um aumento de viscosidade aparente.

- Os maiores valores de viscosidade plástica foram obtidos na faixa de concentrações de HPA acima de 2,2 lb/bbl associada a concentração do pó de serragem acima de 3 lb/bbl, fato esse, indicativo de valores de VP acima de 8 mPa.s, implicando na redução da probabilidade de aparecimento de falhas no processo de perfuração, quando comparada com o agente obturante comercial.
- O pó de serragem é constituído basicamente de macromoléculas como lignina, celulose, hemicelulose e proteínas, as quais possuem sítios adsorptivos, além de apresentarem alta área superficial e com tamanho de poros maiores, isso facilita a interação por ligações de hidrogênio com os polímeros presentes no fluido como goma xantana e HPA.

REFERÊNCIAS

Almeida, J.H., Dias, L.H.P.V., Terra, W.S., ESTUDO DAS MODIFICAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO AQUOSOS, Revista Perspectivas Online: Exatas & Engenharia, V.10, n.28, 2020.

AMORIM, L.V., Melhoria, Proteção e Recuperação da Reologia de Fluidos Hidroargilosos para Uso na Perfuração de Poços de Petróleo, Tese de Doutorado, Doutorado em Engenharia de Processos, UFCG, Campina Grande, dezembro de 2003.

BAGHEBAN SHAHRI, F.; NIAZI, A.; AKRAMI, A. Application of Full Factorial Design for Removal of Polycyclic Aromatic Dye from Aqueous Solution Using 4A Zeolite: Adsorption Isotherms, Thermodynamic and Kinetic Studies. **Polycyclic Aromatic Compounds**, v. 38, n. 2, p. 141–156, 15 mar. 2018.

Chen, X., Gao, D., Yang, J., Luo, M., Feng, Y., Li, X., A Comprehensive Wellbore Stability Model Considering Poroelastic and Thermal Effects for Inclined Wellbores in Deepwater Drilling, *J. Energy Resour. Technol.*, 2018.

MADEIDURA-CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DA MADEIRA. Disponível em <http://www.madeidura.com/publicacoes/caracteristicas-e-propriedades-da-madeira>.

SANTANA, K. R.; Interações entre a carboximetilcelulose, carbonato de cálcio e bentonita: Repercussões sobre as propriedades dos fluidos de perfuração aquosos. Tese (Doutorado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN, 2014.

YANG, J., TANG, H., LIU, Z., YANG, L., HUANG, X., YAN, D. TIAN, R., Prediction model of casing annulus pressure for deepwater well drilling and completion operation, *Petroleum Exploration and Development*, Volume 40, Issue 5, 2013, Pages 661-66.