

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO E ESCOAMENTO DE CASCALHOS APLICADA AO POÇO TESTE ONSHORE 1-GWL-1-RN

AUTORES:

Paloma Andrade Rebouças^{1,3}, Natalino da Silva Souza^{1,3}, Evelyn Kailanny Campelo de Oliveira^{1,3}, Lucas Silva Pereira Sátiro², Gilvandro César de Medeiros², Leonardo Carvalho Montalvão², Cláudio Regis dos Santos Lucas^{1,3}

INSTITUIÇÃO:

¹Faculdade de Engenharia/CAMPUSSAL/UFPA, ²Geowellex do Brasil Serviços Petrolíferos, ³Laboratório de Ciências e Engenharia de Petróleo (LCPetro)

SIMULAÇÃO HIDRÁULICA DE PERFURAÇÃO E ESCOAMENTO DE CASCALHOS APLICADA AO POÇO TESTE ONSHORE 1-GWL-1-RN

Resumo

No processo de perfuração de poços para a exploração de petróleo e gás, a indústria petrolífera enfrenta uma série de problemáticas, muitas delas relacionadas à eficiência e segurança em operações cada vez mais complexas. Neste contexto, o monitoramento hidráulico, realizado convencionalmente pelos serviços de fluidos e *Mud Logging*, tem importante papel para as operações, permitindo avaliações precisas a respeito do transporte de cascalhos, estabilidade de poço, eficiência de perfuração, bom funcionamento de instrumentos e segurança de poço. As simulações computacionais acerca da eficiência de limpeza do poço e hidráulica são essenciais no planejamento de propriedades de fluidos, condições operacionais e ferramentas, além de permitir o estabelecimento de uma linha base de monitoramento. Além disso, ela vem sendo utilizada, nos últimos anos, para o estabelecimento de tecnologias automáticas como *Managed Pressure Drilling*. Por outro lado, não é fácil ter acesso a informações em pontos específicos do sistema que permitam justa comparação entre modelos em poços reais pela prioridade em concluir a operação. Nesse contexto, o presente trabalho visa a simulação de parâmetros hidráulicos específicos aplicados ao poço de simulação 1-GWL-1-RN perfurado pela empresa Geowellex na cidade de Macaíba/RN. O objetivo principal deste trabalho é a simulação hidráulica e de limpeza por meio de modelos disponíveis na literatura que possam ser aplicados ao processo de perfuração de poços, alimentando com informações técnicas à empresa para fazer comparações com dados reais. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos do poço teste mencionado, que possui aproximadamente 120 m de profundidade e foi perfurado com diâmetro de broca de 12 ¼" e atualmente está revestido com 9 ⅝", 36 lbm/ft. Foram utilizados ainda, dados da Sonda de Perfuração GWL-01, que contempla um sistema de circulação convencional, incluindo uma bomba *duplex*; caminho de escoamento com tubo bengala; *power swivel*, uma coluna composta por *Drill Pipes* 5" e *Drill Collar* 6 ½", dois tanques de fluido com volumes de 27 bbl. Para as simulações em questão, considerou-se o range de vazão de 50 a 400 gpm, lavando cascalhos de 0,05 a 0,25 in, densidade de 8,6 a 10,0 ppg, 3 jatos gêmeos de 11 a 13. Os resultados obtidos permitem uma melhor compreensão dos parâmetros do poço, fornecendo-nos conclusões valiosas para otimização de operações, incluindo informações mais precisas sobre o transporte de cascalhos, estabilidade de poço e eficiência de perfuração. Desse modo, o monitoramento hidráulico desempenha papel fundamental, colaborando para eficiência e segurança de processos. Os dados obtidos a partir deste estudo, poderão ser aplicados de forma significativa no processo de exploração e produção, contribuindo para o máximo rendimento e redução de riscos operacionais.

Palavras-chave: Hidráulica de Poços, Limpeza de poço, Simulação, Perfuração de Poços

Abstract

In the process of drilling wells for oil and gas exploration, the oil industry faces a series of problems, many of which relate to efficiency and safety in increasingly complex operations. In this context, hydraulic monitoring, conventionally performed by fluid services and *Mud Logging*, plays a crucial role in operations, enabling precise assessments regarding gravel transport, well stability, drilling efficiency, instrument functionality, and well safety. Computational simulations of well cleaning efficiency and hydraulics are essential in planning fluid properties, operational conditions, and tools,

thereby establishing a baseline for monitoring. Moreover, they have been instrumental in developing automated technologies like Managed Pressure Drilling in recent years. However, accessing specific system information to enable fair comparisons between models in real wells is challenging due to the operational priority of completing tasks swiftly. In this context, this study focuses on simulating specific hydraulic parameters applied to the simulation well 1-GWL-1-RN drilled by Geowellex in Macaíba/RN. The primary objective is to simulate hydraulic and cleaning processes using models from literature to provide technical data for the company to compare with real-world data. The data utilized in this study were obtained from the test well mentioned, approximately 120 meters deep, drilled with a 12 ¼" bit diameter and currently lined with 9 ⅝" casing at 36 lbf/ft. Additionally, data from Drilling Rig GWL-01 were employed, which includes a conventional circulation system comprising a duplex pump, a standpipe flow path, a power swivel, a column of 5" Drill Pipes and 6 ½" Drill Collars, and two fluid tanks with volumes of 27 bbl. For the simulations, variables such as flow rates ranging from 50 to 400 gpm, gravel wash sizes from 0.05 to 0.25 inches, and densities from 8.6 to 10.0 ppg were considered, along with three twin jets of 11 to 13. The results obtained provide a better understanding of well parameters, offering valuable conclusions for optimizing operations, including more precise insights into gravel transport, well stability, and drilling efficiency. Thus, hydraulic monitoring plays a pivotal role in enhancing process efficiency and safety. The data derived from this study can significantly enhance exploration and production processes, maximizing efficiency and reducing operational risks.

Keywords: Well Hydraulics, Well Cleaning, Simulation, Well Drilling

Introdução

A perfuração de poços para a exploração de petróleo e gás é uma operação fundamental, complexa e desafiadora que exige uma abordagem multidisciplinar para garantir a eficácia e a segurança dos processos. A indústria petrolífera como um todo, enfrenta diariamente diversos problemas, muitos dos quais relacionados ao desempenho e à proteção de operações em ambientes complexos, onde fatores como rotação da coluna de perfuração e as propriedades do fluido são grandes influenciadores (Fajner *et al.*, 2008). Neste contexto, o monitoramento hidráulico tem um papel crucial, pois permite-nos uma avaliação precisa de diversos aspectos operacionais, como: transporte de cascalhos, estabilidade de poços, efetividade da perfuração e funcionamento adequado dos instrumentos (Zoellner *et al.*, 2011).

Tradicionalmente, o processo de monitoramento hidráulico durante o processo de perfuração é realizado por meio de serviços de fluidos e *Mud Logging* que nos fornecem dados essenciais para a tomada de decisões durante a perfuração. No entanto, simulações computacionais também são de extrema importância, pois desempenham papel fundamental no planejamento de poços. Elas permitem não apenas simular parâmetros hidráulicos e eficiência na limpeza de poços, mas também estimar o comportamento do escoamento ao longo da coluna e otimizar vazões (Naccache, 2015). Porém, em alguns casos, a simulação tem sido um enorme desafio, especialmente naquele com perfuração de longo afastamento (ERD – *Extended Reach Drilling*) ou de janela operacional estreita, uma vez que exigem um controle hidráulico extremamente preciso para evitar problemas de perda de circulação, influxo e instabilidade do poço (Fruhworth, Thonhauser e Mathis, 2006). Além disso, simular permite-nos estabelecer uma linha de base de monitoramento essencial para comparar os dados reais obtidos durante a perfuração.

O avanço das tecnologias automáticas, como o Managed Pressure Drilling (MPD), ressalta ainda mais a importância dessas simulações (Kinik e Osayande, 2015). No entanto, nem sempre é fácil a obtenção de dados e informações detalhadas em pontos específicos do sistema de perfuração, como por exemplo dados sobre as propriedades reológicas, onde a previsão inadequada desses parâmetros

pode ser crucial no cálculo hidráulico devido sua influência direta na análise de escoamento e perdas de carga. Ignorar tais propriedades pode levar a erros significativos em projetos e operações de sistemas que envolvem a movimentação de fluidos (Ochoa, 2006). Logo, esta lacuna de informações pode dificultar a justa comparação entre modelos teóricos e dados reais, limitando o potencial de otimização das operações.

Sendo assim, a utilização de experimentos fatoriais, pode ajudar-nos a compreender as principais problemáticas encontradas em campo e suas possíveis interações. Para isso, será utilizado o *software* Statistica, assim como uma planilha de variáveis cálculos hidráulicos baseados na norma API e que são frequentemente usados na indústria. Visando sempre a interpretação de dados e resolução de problemáticas.

Os resultados deste experimento nos permitirão uma melhor compreensão dos parâmetros do poço, proporcionando conclusões valiosas para aprimorar operações. Obtendo informações mais precisas sobre o transporte de cascalhos, estabilidade do poço e eficiência de perfuração, contribuindo para a segurança dos procedimentos. Dessa forma, a integração de simulações hidráulicas com dados reais apresenta um passo importante na busca por metodologia mais apropriadas e estáveis. O estudo também contribuirá significativamente para a indústria, fornecendo dados que podem ser aplicados de maneira prática e eficaz.

Metodologia

Para este estudo, a metodologia empregada envolve análise estatística utilizando experimento fatorial a partir da manipulação do *software* Statistica, que será aplicado para investigação e interpretação de dados e que nos permitirá diversos tipos de análises entre as variáveis de interesse. Este experimento levará em consideração 4 variáveis de entrada como diâmetro do cascalho, vazão de injeção, tamanho do jato e densidade do fluido de perfuração; e 3 variáveis de resposta como potência hidráulica por unidade de área de poço (HSI), força de impacto do jato de fluido (FI) e eficiência geral de remoção de cascalhos (RTG).

A partir da inclusão dos dados pré-definidos para cada variável de entrada, o programa Statistica gerou 17 combinações experimentais onde a última incluía valores do ponto central de cada variável. Isto permitiu-nos uma análise mais detalhada dos efeitos e interações entre as mesmas. Para cada combinação experimental, os valores das variáveis de entrada eram inseridos em uma planilha do Excel, desenvolvida pela empresa Geowellex, configurada com cálculos hidráulicos comumente utilizados na indústria e baseados na norma API RP 13D. A planilha retorna com os valores correspondentes para HSI, FI e RTG que também eram inseridos no *software*.

Com todos os dados coletados e adicionados ao Statistica, iniciou-se a realização da análise de Design Experimental (DOE), utilizando o tipo de experimento “2** (K-p)” que se refere a um projeto de experimentos fracionados, empregados quando deseja-se analisar consideráveis números de fatores usando números reduzidos de ensaios. As análises, para este caso, incluíram Gráficos de Pareto, para identificar os efeitos mais significativos das variáveis de entrada sobre as variáveis de resposta, *Fitted surface* para visualizar a relação entre os dois tipos de variáveis escolhida em cada avaliação e o Gráfico de *Predicted Values X Observed Values* para verificar a precisão do modelo ajustado. Por meio dessa metodologia, os resultados permitiram-nos identificar quais combinações de variáveis maximizam a eficiência em remoção de cascalhos, potência hidráulica e força de impacto tendo como referência a perfuração do poço teste 1-GWL-1-RN, proporcionando-nos uma base sólida para buscar otimizações dos parâmetros operacionais nas condições estudadas.

Resultados e Discussão

O primeiro gráfico desenvolvido e analisado foi o de Pareto, que revelou as interações mais significativas entre a variável independente HSI, sobre as de resposta. O Gráfico de Pareto (Figura 1), indica que a vazão de injeção tem um efeito altamente significativo e positivo sobre o HSI. Ou seja, quanto maior a vazão de injeção, maior será a potência hidráulica. Sendo este, o efeito mais dominante entre todos os outros fatores analisados. Por outro lado, o tamanho de jato utilizado tem um efeito significativamente negativo sobre o HSI, sugerindo que a seleção de jatos maiores pode reduzir o potencial hidráulico de forma importante. A interação entre o tamanho de jato e o diâmetro do cascalho (2by3) também é significativa e apresenta efeito negativo sobre o HSI, indicando que a combinação de jatos com determinadas variações de diâmetro de cascalho pode diminuir a potência hidráulica do sistema. Com esta análise pode-se concluir que a vazão de injeção é o fator mais crítico e afeta positivamente o HSI, assim como o tamanho de jatos. Logo, ajustar as vazões e aumentar as densidades, pode resultar em uma melhoria no potencial hidráulico. As interações que não alcançaram a linha de significância estatística serão consideradas não significativas no impacto do HSI.

Na Figura 2, o gráfico de Pareto mostra os efeitos das variáveis independentes e suas interações sobre a RTG. Pode-se observar que o diâmetro do cascalho impacta negativamente a eficiência na remoção dos cascalhos, enquanto que a vazão de injeção do fluido contribui positivamente. A interação entre ambos apresenta certa contribuição, apesar de ser pouca, sugerindo que a combinação entre elas pode impactar na eficiência de limpeza em poços de forma significativa. A densidade do fluido também tem um efeito positivo, porém menos significativo sobre a RTG, sugerindo que aumentar os valores desta densidade pode melhorar a eficiência da remoção de cascalhos, talvez pelo empuxo.

A partir da Figura 3, observa-se a relação e os efeitos gerados com a interação da força de impacto do jato (FI) com as variáveis independentes. A vazão de injeção, por exemplo, tem efeito positivo e altamente elevado sobre a FI. Ou seja, quanto maior a vazão, maior a força de impacto gerada. O tamanho de jato utilizado também apresenta relevância à análise, porém de forma negativa. Nesta análise também é válido destacar, que entre interações realizadas com tamanhos de jato e diâmetro de cascalhos, observou significância negativa.

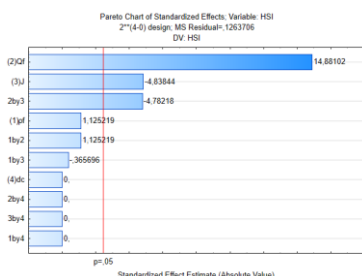


Figura 1: Gráfico de Pareto para o HSI

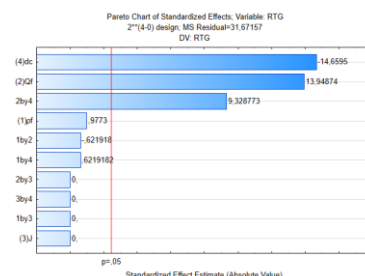


Figura 2: Gráfico de Pareto para o RTG

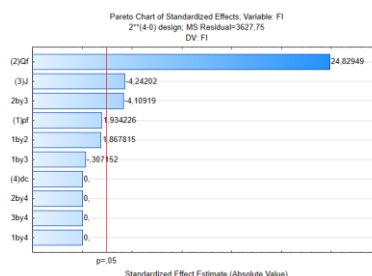


Imagem 3: Gráfico de Pareto para o FI

Na Figura 4, o gráfico tridimensional das análises relaciona a vazão de injeção e densidade do fluido com o HSI. As cores vermelho e verde indicam os valores mais altos e mais baixos para o HSI, respectivamente. Foi identificado que o HSI aumenta juntamente com a vazão de injeção, confirmando a análise de Pareto que indicava que a vazão do jato é um fator significativo quando relacionado com o HSI. A densidade de fluido também influencia, porém ainda é um efeito menos significativo.

Relacionando o HSI com as variáveis diâmetro de cascalho e tamanho de jato (Figura 5), observou-se que o HSI tende a aumentar com a redução do diâmetro de cascalho e que há uma diferença perceptível no HSI dependendo do tamanho de jato utilizado.

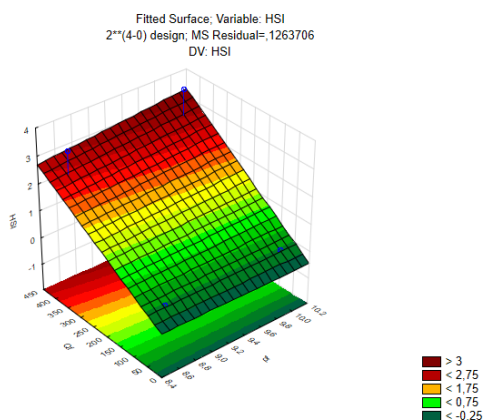


Figura 4: Gráfico tridimensional para HSI (Vazão de injeção x Densidade do fluido)

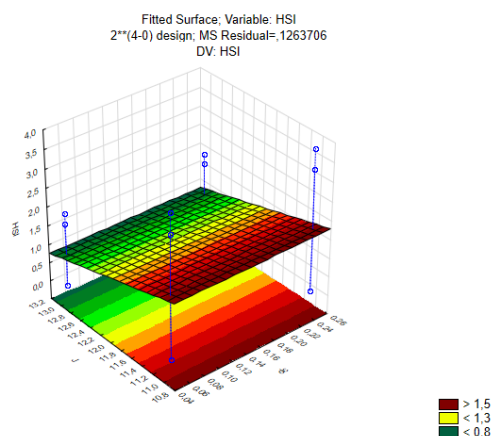


Figura 5: Gráfico tridimensional para HSI (Diâmetro do cascalho x Tamanho de Jato)

A Figura 6 mostra a relação entre RTG com a vazão e densidade do fluido. É notado que o aumento da vazão tende a aumentar o RTG, especialmente com densidades em níveis intermediários. Assim, quando a densidade do fluido está em níveis mais baixos, o RTG é menor, mas conforme a densidade aumenta o RTG também tende a aumentar até certo ponto. As áreas em vermelho indicam valores altos para o RTG, propondo que há uma combinação ideal de vazão de injeção e densidade do fluido para maximizar os efeitos do RTG.

A Figura 7, correlaciona o RTG com o diâmetro de cascalho e tamanho de jato, sendo notado que a superfície horizontal sugere que alterações significativas do tamanho de jato não alteram drasticamente o valor de RTG, independente do diâmetro do cascalho. No entanto, o tamanho do jato aparenta ter um efeito significativo na variação do RTG.

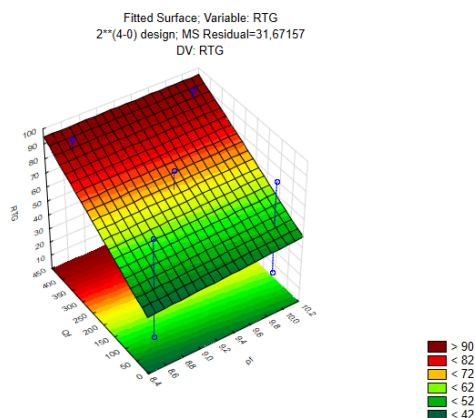


Figura 6: Gráfico tridimensional para RTG (Vazão e Densidade)

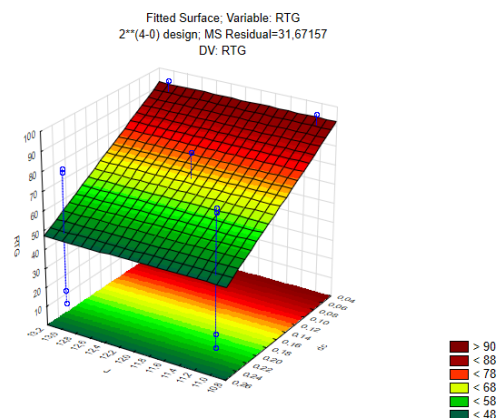


Figura 7: Gráfico tridimensional para RTG (Diâmetro x Tamanho de Jato)

Na Figura 8, é retratada como a força de impacto da broca tende a se comportar quando analisada sua relação entre vazão de injeção e densidade do fluido. Sendo observado que, à medida que a vazão aumenta, a FI também aumenta, especialmente com densidades de fluido mais altas. Porém, a densidade do fluido em si apresenta pouco impacto na FI, quando comparado com a vazão de injeção. Mas, ao analisar o FI juntamente com o diâmetro de cascalho e tamanho de jato, observou-se que ambas as duas variáveis de entrada não alteram significativamente a força de impacto da broca. Ambas mantêm a FI em torno de um valor constante.

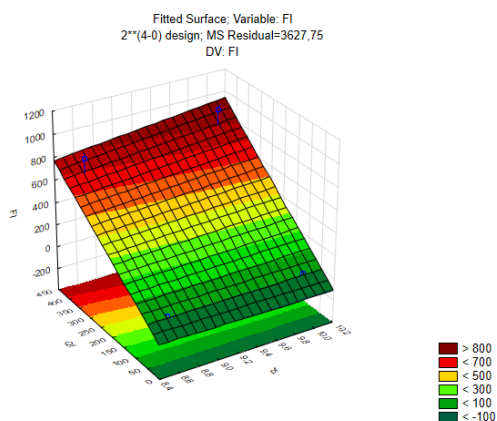


Figura 8: Gráfico tridimensional para o FI (Vazão x Densidade)

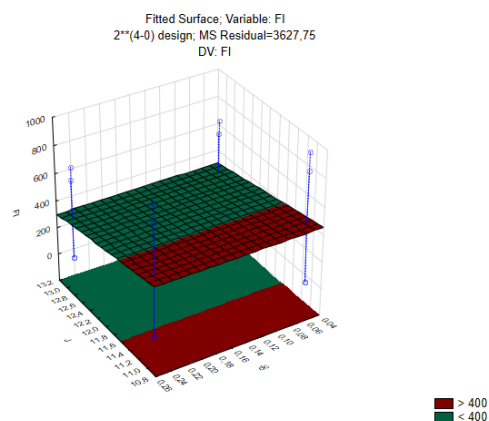


Figura 9: Gráfico tridimensional para FI (Diâmetro do cascalho x Tamanho de Jato)

Os Gráficos de Dispersão representados nas Figura 10, 11 e 12 mostram a relação entre valores observados e valores preditos para HSI, RTG e FI em cada Figura, respectivamente. A linha vermelha indica que os valores observados são iguais aos preditos. Quando os valores apresentam certa proximidade com a linha, entende-se que o modelo de estudo e análise está bem ajustado, validando a precisão das previsões feitas.

Para o gráfico analisando o HSI (Figura 10), notou-se que o modelo ajustado prevê bem os valores para HSI observados. Onde a proximidade dos pontos com a linha vermelha sugere o bom ajuste do modelo, o que valida as previsões. O Gráfico de Dispersão do RTG (Figura 11), também indica que o modelo se encontra bem ajustado, apesar de alguns pontos estarem um pouco distantes. Logo, o modelo é bom, mas não perfeito em suas previsões. No gráfico da Figura 12, assim como nos anteriores, é observado que a maioria dos pontos está próximo à linha vermelha, indicando também um bom ajuste com os dados do modelo interpretado. Contudo, pode haver sim algumas discrepâncias, sugerindo que, embora o modelo esteja consideravelmente ajustado, há algumas áreas onde a previsão pode não ter sido tão precisa.

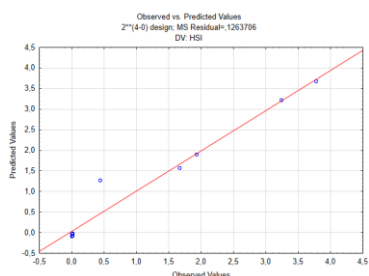


Figura 10: Gráfico de dispersão para HSI.

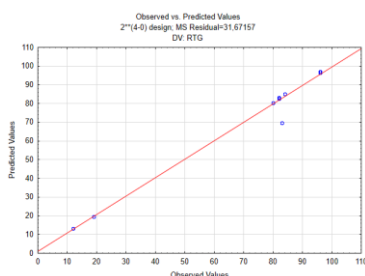


Figura 11: Gráfico de dispersão para RTG.

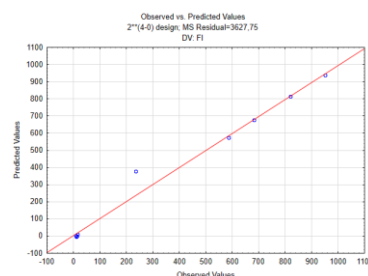


Figura 12: Gráfico de dispersão para FI.

Conclusões

A partir de todas as análises realizadas, para o HSI, primeiramente, conclui-se que tanto a vazão de injeção quanto a densidade do fluido têm uma influência positiva sobre o mesmo; onde ao aumentar tais fatores, o HSI também tende a aumentar. Assim como, ao analisar a Potência Hidráulica com o diâmetro de cascalhos e tamanho de jato, observa-se uma relação mais complexa, sugerindo uma análise mais aprofundada ou ajuste mais detalhados no modelo para uma melhor compreensão. A Eficiência na Remoção de Cascalhos também mostra ser influenciada pela vazão do fluido e pela sua densidade, conforme mostrado no primeiro gráfico de superfície ajustada. O segundo gráfico exhibe que o tamanho de jato também é uma variável importante, se comparado com o diâmetro de cascalho que obtém um efeito menor sobre a Eficiência de Remoção de Cascalhos, o que destaca a importância de otimizar tais parâmetros. O gráfico de dispersão, expõe que o modelo pode ser considerado bom, mas não perfeito, havendo alguns pontos para serem ajustados. Assim como as demais variáveis de entrada, a força de impacto (FI), é altamente influenciada pela vazão de injeção, mas apresenta pouca

relação com a densidade de fluido. Por outro lado, tanto o diâmetro do cascalho quanto o tamanho do jato, apresentaram mínimo impacto na variação de FI. Além disso, o modelo para previsão de FI com base nas variáveis de entrada escolhida é considerado confiável, mesmo havendo pontos atípicos. A partir disto, é possível concluir que todas as variáveis de entrada apresentam alta relação com a vazão de fluido e sua densidade, e pouca relação com diâmetro de cascalho e tamanhos de jatos.

Agradecimentos

Agradecemos a empresa Geowellex do Brasil Serviços Petrolíferos pela parceria na confecção deste trabalho, ao Laboratório de Ciência e Engenharia de Petróleo (LCPetro) e a Faculdade de Engenharia/CAMPUSSAL/UFPA pela infraestrutura da área de estudo.

Referências Bibliográficas

FAJNER, D.; PINELLI, D.; GHADGE, R. S.; MONTANTE, G. I. U. S. E. P. P. I. N. A., PAGLIANTI, A.; MAGELLI, F. Solids distribution and rising velocity of buoyant solid particles in a vessel stirred with multiple impellers. **Chemical Engineering Science**, v. 63, n. 24, p. 5876-5882, 2008.

FRUHWIRTH, R. K.; THONHAUSER, G.; MATHIS, W. Hybrid simulation using neural networks to predict drilling hydraulics in real time. In: **SPE Annual Technical Conference and Exhibition?**. SPE, 2006. p. SPE-103217-MS.

KINIK, K.; GUMUS, F.; OSAYANDE, N. Automated dynamic well control with managed-pressure drilling: a case study and simulation analysis. **SPE Drilling & Completion**, v. 30, n. 02, p. 110-118, 2015.

NACCACHE, M. F. **Simulador de escoamento em poços de produção de petróleo**. Tese de Doutorado. PUC-Rio. 2015.

OCHOA, M. V. **Analysis of drilling fluid rheology and tool joint effect to reduce errors in hydraulics calculations**. Texas A&M University, 2006.

ZOELLNER, P. THONHAUSER, G.; LUEFTENEGGER, M.; SPOERKER, H. F. Automated real-time drilling hydraulics monitoring. In: **SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition**. SPE, 2011. p. SPE-140298-MS.