



ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE PARÂMETROS NA MODELAGEM DE ESCOAMENTO EM FRATURAS

F. M. VIEIRA¹, G. M. P. ANDRADE¹, J. S. C. COELHO², C. M. SCHEID¹, L. A. CALÇADA¹.

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química

²Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Departamento de Matemática

E-mail para contato: felipe.vieira_martins@hotmail.com

RESUMO – Durante a perfuração de poços para produção de petróleo, o aumento da pressão pode causar fraturas na formação. Caso haja a perda do fluido de perfuração para a formação por essas fraturas, a pressão do poço pode diminuir até tornar-se inferior à pressão da formação, fazendo com que ocorra a invasão de fluido para o poço. Neste caso, é necessário minimizar as perdas e isso geralmente é feito pela adição de aditivos (LCM's) ao fluido de perfuração. Neste trabalho foi feito o estudo da influência dos parâmetros reológicos do fluido de combate à perda, consequentemente, do(s) LCM(s), na modelagem do escoamento em fraturas, bem como a influência do diâmetro hidráulico definido para as fraturas. O modelo utilizado propõe uma correlação entre os parâmetros reológicos do fluido, o diâmetro que caracteriza a fratura e a vazão da perda. Na análise do efeito da reologia e do diâmetro hidráulico na vazão do fluido no escoamento em fraturas foi utilizando o método de Monte Carlo. Observou-se que o aumento dos valores dos parâmetros reológicos minimiza a vazão do fluido em fraturas, e com isso, a perda do fluido, bem como o comportamento oposto em relação ao diâmetro hidráulico da fratura.

1. INTRODUÇÃO

A constante demanda por combustíveis fósseis trás para a indústria a necessidade de explorar reservas em condições adversas. Dessa forma, é preciso que haja o desenvolvimento de pesquisas que ajudem a compreender melhor os fenômenos que ocorrem durante a produção, facilitando o controle e otimização do processo (Borges *et al.*, 2018). Durante a perfuração do poço, muitas variáveis devem ser controladas, como a pressão do poço. Para o controle da pressão, usa-se o fluido de perfuração injetado no poço pela coluna de perfuração, que também possui como funções lubrificar, resfriar e carrear material gerado, conforme Andrade *et al.* (2018). Entretanto, essa injeção de fluido pode causar um aumento excessivo de pressão, a qual danifica a formação rochosa, gerando fraturas (Godoi *et al.*, 2017).

A constante perda do fluido para a formação (chamada perda de circulação) pode causar problemas como o “Kick”, onde o fluido da formação entra no poço por falta de pressão no mesmo (Andrade *et al.*, 2018). Sendo assim, é preciso evitar a constante perda de circulação. Para isso, geralmente são acrescentados aditivos ao fluido, os materiais de combate à perda de circulação ou *lost circulation materials* (LCM). Há uma diversidade de LCM's disponíveis

(Alsaba e Nygaard, 2014), com diferentes propriedades reológicas atreladas. Segundo Borges *et al.* (2018), esses aditivos mudam as propriedades reológicas do fluido e sua distribuição de tamanho de partícula, facilitando a ação selante.

A correlação estudada neste trabalho, prevê valores de vazão em função dos parâmetros reológicos do fluido, da queda de pressão e das características físicas da fratura. É baseado em um rearranjo da equação usada por Borges *et al.* (2018) para o cálculo de perda de carga de fluidos em fraturas. Foi desenvolvido considerando o modelo reológico de Herschel-Bulkley e escoamento em regime laminar. A partir desse modelo foi feita a análise de sensibilidade com o objetivo de caracterizar a sensibilidade da vazão do fluido em fraturas frente às mudanças nos parâmetros de entrada, isto é, os parâmetros reológicos e o diâmetro hidráulico da fratura, considerando suas respectivas incertezas (Kennedy e O'Hagan, 2001). A partir dessa análise, pode-se identificar quais parâmetros são relevantes no controle da perda de circulação, a fim de se alcançar os resultados desejados para a saída do modelo.

No combate à perda de circulação em fraturas, é desejável que a vazão seja minimizada. Portanto, é interessante determinar quais dos parâmetros de entrada têm maior influência na vazão, possibilitando seu controle por meio de ajustes nesses parâmetros. Para a realização da análise de sensibilidade, foi proposto o método de Monte Carlo que se baseia na teoria Bayesiana, onde os parâmetros são tidos como variáveis aleatórias e possuem uma distribuição de probabilidade associada (*a priori*). Esse método possibilita que a variação proveniente dos parâmetros seja incorporada na saída do modelo, através de “N” execuções do mesmo a partir de valores sorteados das distribuições dos parâmetros (O'Hagan, 2006). No presente caso, foram propostas *a priori* para os seguintes parâmetros: tensão inicial (τ_0), índice de consistência (k), índice de comportamento do fluido (n) e diâmetro hidráulico da fratura (D_H).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Modelagem Do Escoamento Em Fratura

O modelo estudado baseia-se na equação de Darcy-Weisbach, a qual relaciona a velocidade média de escoamento com a queda de pressão para fluidos Newtonianos que escoam em tubos circulares. Para que a equação descreva o escoamento de fluidos em tubos não circulares, foi preciso inserir o conceito de diâmetro hidráulico (Bird *et al.*, 2012).

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \left(\frac{L}{D_H} \right) \frac{v^2}{2g}. \quad (1)$$

O fator de atrito pode ser definido como mostra a equação (2). Aplicando as fórmulas para o número de Reynolds e do fator de atrito na equação (1), obtém-se a equação (3)

$$f = \frac{a}{Re}, \quad (2)$$

$$\Delta P = \frac{2QLa\mu}{\pi (D_H)^4}. \quad (3)$$

Para que a equação represente o escoamento de fluidos não Newtonianos, segundo o modelo reológico de Herschel-Bulkley, substituiu-se a viscosidade pela viscosidade aparente que, segundo Bird *et al.* (2012), é dada por

$$\mu_{app} = \frac{(\tau_0 + k\gamma^n)}{\gamma}. \quad (4)$$

Para calcular a taxa de cisalhamento, pode-se usar a seguinte equação utilizada por Godoi *et al.* (2017).

$$\gamma = \frac{6,4}{D_H}. \quad (5)$$

Substituindo a equação (4) e a equação (5) na equação (3), rearranjando a equação e tomando α e β definidos nas equações (6) e (7), obtemos a equação (8)

$$\alpha = \frac{\tau_0 a L}{2\delta}, \quad (6)$$

$$\beta = \frac{K a L \delta^{n-1}}{2^{n+2} \pi^n}, \quad (7)$$

$$Q = \left[\left(\Delta P - \frac{\alpha}{D_H} \right) / \beta \left(\frac{2}{D_H} \right)^{3n+1} \right]^{1/n}, \quad (8)$$

onde a é a constante reológica (adm.), f o fator de atrito de Darcy (adm.), τ_0 a tensão inicial de escoamento (Pa), K o índice de consistência (Pa.sⁿ), n o índice de comportamento (adm.), L o comprimento da fratura (m), γ a taxa de cisalhamento (s⁻¹), μ a viscosidade do fluido (Pa.s), μ_{app} a viscosidade aparente do fluido (Pa.s), v a velocidade de escoamento do fluido na fratura (m/s), ρ a densidade do fluido (g/cm³), g a aceleração da gravidade (m/s²), Re o número de Reynolds (adm.), ΔP a diferença de pressão na fratura (Pa) e Q a vazão do fluido na fratura (m³/s).

2.2. Análise De Sensibilidade

De acordo com os parâmetros reológicos (τ_0 , k e n) ajustados da reologia de 21 fluidos selantes preparados por Borges *et al.* (2012) e Godoi *et al.* (2017) foram propostas distribuições *a priori* uniformes para cada parâmetro. A distribuição uniforme foi escolhida devido não haver informações sobre o comportamento específico de cada parâmetro de entrada. A função de distribuição de probabilidade foi dada por

$$f_X(X) = \begin{cases} \frac{1}{b-a'}, & \text{para } a' \leq X \leq b \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}, \quad (9)$$

onde $f_X(X)$ é a função de distribuição de probabilidade da variável X , a' e b são os parâmetros da uniforme, sendo b o limite máximo do domínio da variável X e a' o limite mínimo. Os limites



das distribuições uniformes foram obtidos levando em conta os valores máximos e mínimos dos parâmetros reológicos dos fluidos, sendo 3,48 e 6,01 Pa para τ_0 , 0,14 e 0,69 Pa.sⁿ para k e 0,39 e 0,69 para n (Borges *et al.*, 2012 e Godoi *et al.*, 2017). No caso do diâmetro hidráulico (D_H), a determinação dos limites da distribuição foi feita com base em uma unidade experimental de simulação de escoamento de fluidos em fraturas presente no Laboratório de Escoamento de Fluidos da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, sendo os limites de 8,00 e 10,00 mm. Com isso, foram amostrados 3000 valores de cada uma das distribuições *a priori*, gerando 3000 execuções do modelo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram efetuadas 3000 amostragens de cada uma das *a priori* propostas para os parâmetros, isto é, para τ_0 , k , n e D_H e realizadas 3000 execuções do modelo. Com isso gerou-se diagramas de dispersão e histogramas para se observar o comportamento da vazão para diferentes valores das variáveis de entrada. A Figura 1 apresenta dados típicos obtidos neste trabalho de dispersão e histogramas relacionados ao índice de consistência e ao diâmetro hidráulico. Nota-se pela linha de regressão linear (mostrada na cor vermelha em cada diagrama), que os valores de vazão decrescem com o aumento do índice de consistência (a) e crescem com o aumento do diâmetro hidráulico (b). Além disso, os histogramas mostram a distribuição dos valores de vazão para valores dos parâmetros de entrada maiores e menores que suas respectivas medianas, isto é, 0,65 Pa.sⁿ para k e 4,75 mm para D_H .

Através dos resultados dos diagramas e histogramas mostrados e dos demais obtidos, nota-se que há menor probabilidade de ocorrer altos valores de vazão para altos valores dos parâmetros reológicos. Sendo assim, o aumento de n , k e τ_0 proporcionam fluidos com maior controle de perda de circulação. Entretanto, nota-se também, altos valores de vazão resultantes para altos valores de diâmetro hidráulico da fratura.

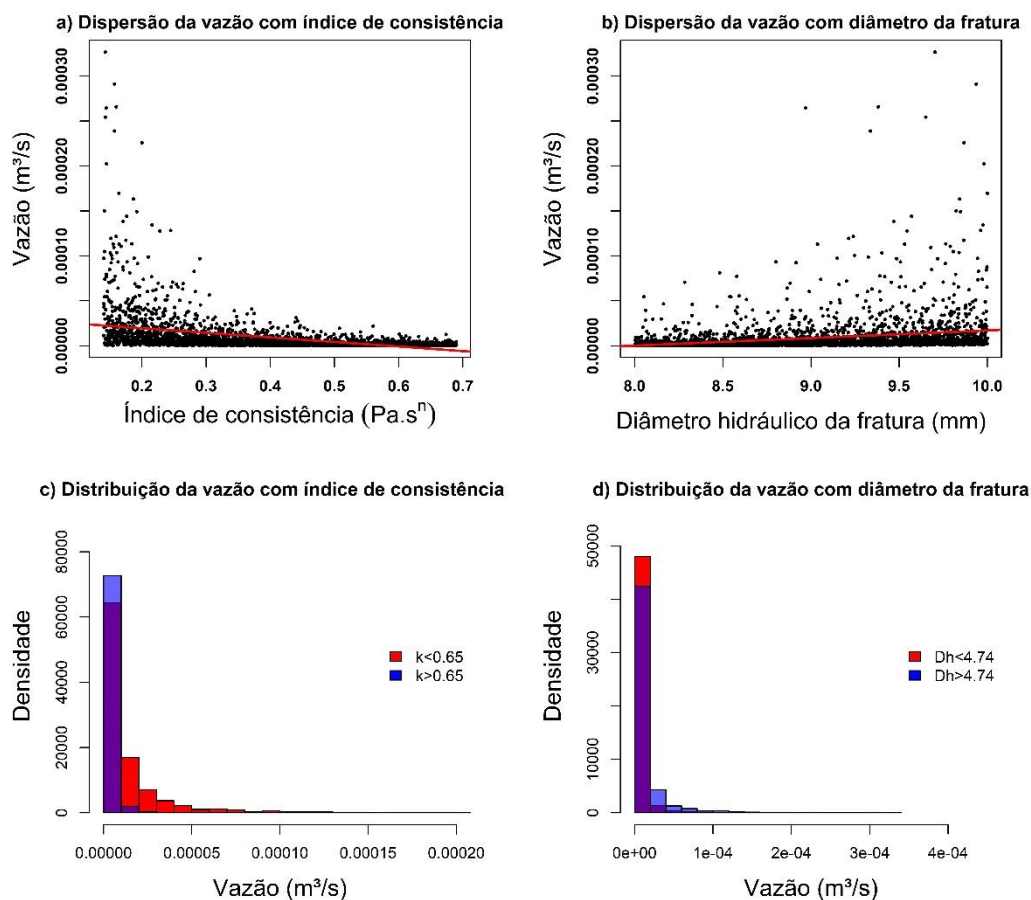
Foram calculados os coeficientes de correlação de cada um dos parâmetros com a vazão. Os resultados desse cálculo são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado dos cálculos dos coeficientes de correção

Correlação	Coefficiente de Correlação
Vazão e tensão inicial	-0,2447873
Vazão e índice de consistência	-0,3895638
Vazão e índice de comportamento	-0,2610902
Vazão e diâmetro hidráulico da fratura	0,2264140



Figura 1 – Dados de dispersão, regressão linear e distribuição dos valores de vazão.



O aumento de todos os parâmetros reológicos (τ_0 , k e n) implicam em uma maior resistência ao escoamento do fluido. Pode-se observar na equação (10) a relação entre a tensão cisalhante (τ) necessária para o escoamento de fluidos que seguem o modelo de Herschel-Bulkley em função dos parâmetros reológicos.

$$\tau = (k\gamma^n + \tau_0). \quad (10)$$

A equação (11) mostra a relação entre a vazão e o diâmetro hidráulico da fratura. Pode-se observar que para maiores valores de D_H obtém-se maiores valores de vazão,

$$Q = v\pi \frac{D_H^2}{4}. \quad (11)$$

Dessa forma, foi possível avaliar a sensibilidade da vazão frente às mudanças nos parâmetros τ_0 , k , n e D_H no escoamento e selamento de fraturas. Por exemplo, o aumento de τ_0 , k , n em um fluido melhora sua capacidade de selamento. Neste trabalho, o estudo estatístico baseado no método de Monte Carlo possibilitou verificar o efeito dos parâmetros reológicos do fluido e do diâmetro hidráulico no escoamento em fraturas.

4. CONCLUSÃO



Com base nos resultados obtidos a partir dos métodos aplicados, pode-se concluir que todos os parâmetros de entrada estudados, isto é, τ_0 , k , n e D_H , possuem influência na saída do modelo. O único parâmetro de entrada que demonstrou potencializar a probabilidade de obter-se valores altos de vazão com seu aumento foi o diâmetro hidráulico da fratura. Todos os parâmetros reológicos do fluido minimizam a probabilidade de ocorrência de altos valores de vazão quando altos. Dessa forma, o uso de LCM's que gerem altos valores dos parâmetros reológicos concedem ao fluido maior controle da perda de circulação. O parâmetro que demonstrou melhor mitigar a perda de circulação foi o índice de consistência, demonstrado pelo coeficiente de correlação negativo de maior módulo.

Portanto, nota-se que para minimizar a vazão do fluido de perfuração em fraturas, a fim de mitigar os danos causados pela perda de circulação, pode-se aumentar os valores de seus parâmetros reológicos. O parâmetro de maior interesse para tal é o índice de consistência do fluido (k), uma vez que ele demonstrou ter o valor negativo de coeficiente de correlação de maior módulo dentre os parâmetros investigados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica PIBIC, à Petrobrás e à UFRRJ pelo apoio financeiro.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade G. M. P.; Oechsler B. F.; Coelho J. S. C.; Fagundes F. M.; Damasceno J. J. R.; Calçada L. A. Settling of Barite in Non-Newtonian Confined Fluids to Off-Shore Drilling Wells: Part II - Evaluation of the effect of choice of Characteristic Particle Size by Monte Carlo Method. *Powder Technology*. Submetido em 2018.
- Alsaba, M.; Nygaard, R. Review of lost circulation materials and treatments with an updated classification. *AADE National Technical Conference and Exhibition*, Houston, USA, 2014.
- Borges, M. N.; Calçada, L. A.; Godoi, F. A. P.; Scheid, C. M.; Ribeiro, M. S.; Soares, A. S. F. A new correlation between pressure drop-fluid flow and the prediction of hydraulic diameter of fractures. 2018.
- Bird, R. B.; Stewart, W. E.; Lightfoot, E. N. *Fenômenos de transporte*. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- Cook, J., Growcock, F., Guo, G., Van Oort, E., Hodder, M. Stabilizing the wellbore to prevent lost circulation. *Oilfield Review Winter*, no. 4, Schlumberger, 2012.
- Godoi, F. A. P.; Scheid, C. M.; Bernardo, L. S.; Oliveira, B. R.; Borges Filho, M. N.; Calçada, L. A. Study of the pressure drop and the flow of loss circulation material suspensions in a physical simulator of fractures, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2017.
- Kennedy, M. C.; O'Hagan, A. Bayesian calibration of computer models. *J. R. Statist. Soc. B.* 63, Part 3, pp. 425-464, 2001.
- O'Hagan A., Bayesian analysis of computer code outputs: A tutorial. *ELSEVIER*, p. 1,2,6,7, 2006.