

ESTUDO DA SEDIMENTAÇÃO GRAVITACIONAL DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

BASÍLIO, A.^{1*}, SCHIMICOSKI, R. S.¹, FAGUNDES, F. M.¹, MARCONDELLI, L. C.¹,
DAMASCENO, J. J. R.¹, AROUCA, F. O.¹

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Av. João Naves de Ávila, bloco 1K, Santa Mônica, Uberlândia/MG, CEP: 38408-100

*e-mail: adambasilio211@gmail.com

RESUMO - Dentro da indústria do petróleo, fluidos de perfuração são utilizados para lubrificar a broca, fornecer pressão hidrostática, manter a estabilidade do poço e carrear detritos para a superfície. Durante paradas operacionais, sólidos suspensos na coluna se sedimentam, podendo causar graves problemas. Este trabalho buscou estudar a sedimentação gravitacional de dois fluidos de perfuração reais, identificados como F1 e F2, pela técnica de Atenuação de Raios Gamma (TARG). A diferença na composição entre eles consistiu apenas no teor de CaCO₃, maior no fluido F2. Também foram realizadas análises reológicas sobre os fluidos. Os resultados mostraram que os fluidos puderam ser caracterizados como fluidos de Bingham, que é um tipo interessante para a indústria, devido à presença de uma tensão crítica de cisalhamento, retardando a velocidade de sedimentação. Além disso, a resistência à deformação do fluido F1 foi maior. A análise da TARG mostrou que a sedimentação no fluido F1 ocorreu mais lentamente que no fluido F2, apesar de ambos os fluidos terem alcançado o mesmo estágio final em relação à altura do leito de sólidos. Dado objetivo específico para os fluidos de perfuração durante momentos de repouso, concluiu-se que o fluido F1, com menor teor de sólidos, teve melhor desempenho.

INTRODUÇÃO

Na indústria de petróleo, fluidos de perfuração são aqueles usados na etapa de perfuração de poços. Eles são bombeados na coluna de perfuração coaxialmente com o eixo das brocas (Shah *et al.*, 2010). Estes fluidos são especialmente elaborados com aditivos, solúveis e suspensos, para exercerem determinadas funções no processo de operação, dentre elas a lubrificação e resfriamento das brocas e fornecer pressão hidráulica nas paredes da coluna entre outras (Growcock e Harvey, 2005). Uma função importante destes fluidos é a de retenção de sólidos quando, por algum motivo, houver paradas no processo de perfuração. Nestes casos, os sólidos suspensos (tanto do próprio fluido quanto aqueles que foram produzidos na perfuração) tendem a sedimentar devido à ação da gravidade, o que pode levar a problemas graves para a operação, como o aprisionamento da broca e o aumento da

pressão na região anular da coluna de perfuração (Gandelman e Pinto, 2009; Moreira, 2014). Assim, cabe ao fluido de perfuração impedir ou retardar a sedimentação destes sólidos suspensos.

Fluidos não-Newtonianos possuem, como principal característica, o fato de ter um comportamento reológico não linear, ou seja, a viscosidade destes fluidos se altera a depender de fatores do meio em que este é aplicado (Chhabra, 2007). Dessa forma, em momentos em que o fluido está sob agitação, como durante a perfuração, sua viscosidade será diferente quando comparada a momentos de repouso, permitindo alcançar o objetivo de manter os sólidos em suspensão.

Durante as paradas operacionais, é importante para a indústria saber o comportamento da suspensão quanto a sua estabilidade, ou seja, quanto o fluido consegue reduzir a velocidade de sedimentação (Chhabra, 2007). Ensaios de sedimentação são importantes ferramentas de avaliação neste

sentido. Uma técnica para estes ensaios é a Técnica de Atenuação de Raios Gama (Damasceno, 1992). Como ponto forte desta técnica destaca-se a sua capacidade de medir a concentração de sólidos de forma não-invasiva, permitindo o estudo da sedimentação repetidamente.

Isto posto, este trabalho teve como objetivos específicos: 1) a caracterização reológica de dois fluidos reais utilizados na indústria como fluidos de perfuração e 2) o monitoramento da sedimentação gravitacional destes fluidos, simulando o estado de repouso da operação de perfuração. Uma vez tendo alcançado tais objetivos, buscou-se avaliar como estes fatores podem auxiliar no entendimento da função dos fluidos de perfuração.

METODOLOGIA

Os fluidos utilizados neste estudo foram produzidos e enviados pela empresa brasileira de petróleo Petrobras e foram identificados como F1 e F2. Ambos os fluidos são suspensões aquosas e possuem em sua composição agentes viscosificantes, controladores de pH e controladores de espuma em iguais quantidades. Eles diferem apenas na quantidade de CaCO_3 (agente adensante e obturante) adicionado, sendo que o fluido F2 possui uma quantidade maior deste sólido. A concentração inicial de CaCO_3 para o fluido F1 foi de 15,5% (v/v), enquanto que para o fluido F2 foi de 22% (v/v).

Para cada fluido, foram realizados estudos reológicos e de sedimentação conforme descrito nos tópicos abaixo.

Reologia

A reologia é o ramo da física que estuda a deformação e fluxo da matéria, onde podemos estabelecer relações entre tensões de cisalhamento e taxas de deformação dos fluidos, a fim de caracterizá-los e classificá-los. A aplicação de uma força tangencial a um corpo e a sua deformação subsequente constituem a base de observação numa análise reológica (Bird, 2002).

O Viscosímetro Brookfield digital de baixa viscosidade LVDV2T do tipo cone-placa foi o equipamento utilizado neste trabalho,

mantendo o fluido confinado entre cilindros concêntricos à temperatura de 25°C. A escolha do melhor spindle (dispositivo de aplicação de torque que pode apresentar diversas geometrias) para os ensaios foi feita através de testes para os dois fluidos, onde, para cada fluido, escolheu-se o spindle que apresentasse o menor torque para não danificar o equipamento.

Os testes foram conduzidos em triplicata, e os dados dos experimentos foram obtidos utilizando o software RheocalcT. A etapa inicial dos testes consistiu em um pré-cisalhamento de 5 minutos para quebrar as possíveis estruturas gelificadas presentes nas suspensões, seguido de um repouso de 2 minutos para reorganização molecular (Melo, 2008; Fagundes, 2015).

As taxas de deformação foram empregadas de acordo com o intervalo ótimo do torque do viscosímetro para cada suspensão e foram aplicadas até o alcance do estado estacionário.

A Técnica de Atenuação de Raios Gama

O monitoramento da concentração de sólidos ao longo da coluna foi feito através da Técnica de Atenuação de Raios Gama. Esta técnica consiste em incidir o meio com um feixe de raios gama de alta energia e medir a quantidade de energia que foi absorvida por este. A Figura 1 ilustra essa aplicação.

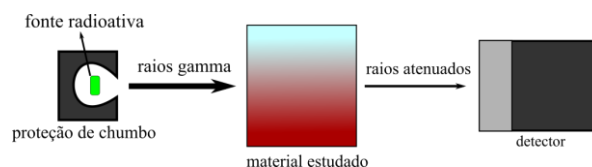


Figura 1: Técnica de atenuação de raios gama.

O feixe de raios gama é emitido pela fonte em direção ao material, que irá absorver parte da radiação, reduzindo sua intensidade. Um detector posicionado atrás do material, alinhado com a fonte, mede a intensidade do feixe após ter passado pelo material. Comparando a intensidade dos feixes que saem da fonte (medido sem o material no caminho) com a intensidade dos feixes quando há a presença do material, é possível calcular a concentração de sólidos da suspensão através da Equação 1 abaixo (Gardner e Ely Jr, 1967):

$$\ln \left(\frac{R_0}{R(t)} \right) = \beta \varepsilon_s(t) \quad (1)$$

Em que ε_s representa a concentração de sólidos, R_0 representa a intensidade do feixe medida quando não há sólidos ($\varepsilon_s = 0$) e R representa a intensidade do feixe em um determinado momento. O fator β é um fator de calibração determinado experimentalmente ao aplicar a Equação 1 em um sistema de concentrações conhecidas.

Neste sistema foram usados dois pontos de referência para se calcular o valor de β :

- O ponto inicial tal que ($\varepsilon_s = \varepsilon_{s,0}$, $R(t) = R_0$), sendo $\varepsilon_{s,0}$ um valor conhecido, fornecido pela fabricante do fluido.
- O ponto no final da sedimentação, tal que ($\varepsilon_s = 0$, $R(t) = R_{\text{final}}$)

Assim, traçou-se uma reta passando pela origem e tendo β como o coeficiente angular.

Coletando os dados de atenuação

O sistema fonte-detector foi acoplado a uma estrutura metálica conforme ilustrado na Figura 2. Nesta figura, a estrutura indicada em (1) pode-se mover nos eixos horizontal e vertical. No entanto, para este estudo, apenas o movimento do eixo vertical foi utilizado. Para os experimentos, 500 mL de fluido foram adicionados a tubos cilíndricos de vidro e estes foram posicionados na base do equipamento (2) entre a fonte (3) e o detector (4).

Dessa forma, a técnica foi aplicada em diferentes pontos ao longo do eixo vertical (eixo z), sendo eles $z = (0,5; 2; 4; 8; 12; 16; 18; 20; 22; 23)$ cm, medidos a partir da base da coluna com medidas feitas diariamente até que se notasse uma estabilização nas medidas de concentração, o que aconteceu por volta do dia 55.

As medidas foram feitas da seguinte forma: Em uma determinada posição em z, o sistema fonte-detector coletou intensidade de feixes de raios gama por 20 segundos, registrando o valor após esse tempo. Repetiu-se esse procedimento 10 vezes para cada posição. Por fim, o valor médio de intensidade em cada posição para cada dia foi calculado.



Figura 2: Estrutura metálica e sistema fonte-detector de raios gama. (1) Parte móvel. (2) Base de apoio para o cilindro. (3) Posição da fonte. (4) Posição do detector.

A fonte de raios gama usada neste estudo foi uma célula do isótopo ^{241}Am que produz feixes com carga energética por volta de 60 KeV (Pires, 2018). O detector utilizado foi o modelo ORTEC digiBASE 14-pin.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção estão apresentados os resultados encontrados pelos experimentos citados na metodologia.

Reologia

A Figura 3 mostra o ajuste de modelos reológicos comuns encontrados na literatura, a saber: Herschel-Bulkley, Bingham, *Power-law* e Newton.

As Tabelas 1 e 2 apresentam os valores encontrados para os parâmetros de cada modelo, sendo que τ indica a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido, τ_0 representa a tensão crítica de cisalhamento e indica se há ou não uma tensão mínima a ser aplicada no fluido para que este comece a escoar, m é chamado de índice de consistência e está relacionado à resistência do fluido ao escoamento, n é chamado de índice de comportamento e indica se o fluido tem comportamento Newtoniano ($n = 1$) ou não-Newtoniano ($n \neq 1$) e γ representa a taxa de cisalhamento aplicada (Moreira, 2014).

A Tabela 3 apresenta os valores para o coeficiente de determinação, R^2 , para cada fluido analisado.

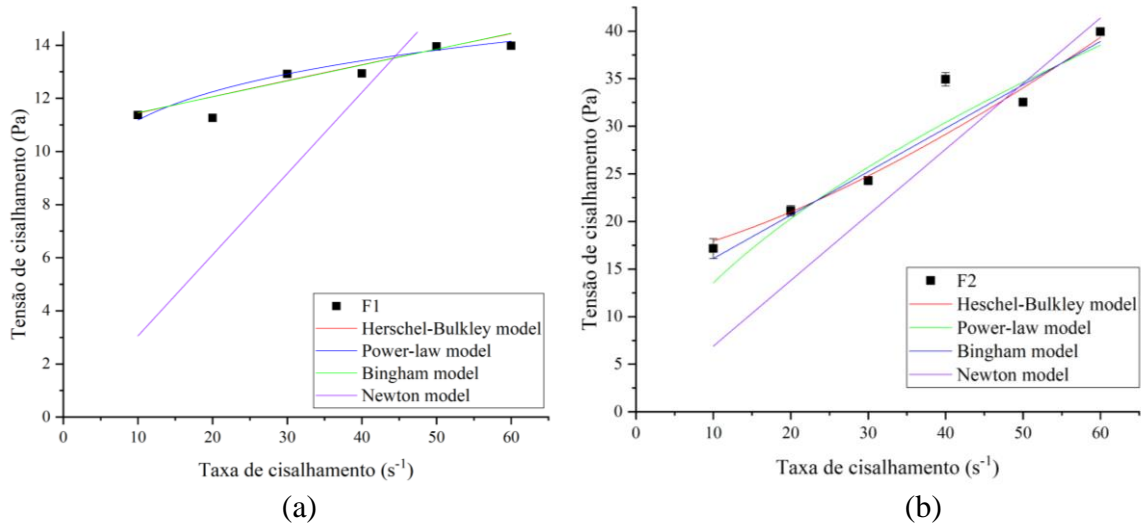


Figura 3: Curva de Escoamento ajustes dos modelos de Herschel-Bulkley, *Power-law*, Bingham e Newton para os fluidos (a) F1 e (b) F2.

Tabela 1: Parâmetros do fluido F1 estimados para os diferentes modelos reológicos.

Modelo	Equação	τ_0	m	n
Newton	$\tau = m\gamma$	-	$0,3056 \pm 0,0537$	-
<i>Power-law</i>	$\tau = m\gamma^n$	-	$7,7254 \pm 0,7483$	$0,1452 \pm 0,0260$
Bingham	$\tau = \tau_0 + m\gamma$	$10,6006 \pm 0,4192$	$0,0587 \pm 0,0092$	-
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\gamma^n$	$9,9085 \pm 2,9013$	$0,2200 \pm 0,8905$	$0,7193 \pm 0,8282$

Tabela 2: Parâmetros do fluido F2 estimados para os diferentes modelos reológicos.

Modelo	Equação	τ_0	m	n
Newton	$\tau = m\gamma$	-	$0,6898 \pm 0,0391$	-
<i>Power-law</i>	$\tau = m\gamma^n$	-	$3,5328 \pm 1,4158$	$0,5835 \pm 0,1031$
Bingham	$\tau = \tau_0 + m\gamma$	$11,5440 \pm 2,8808$	$0,4562 \pm 0,0615$	-
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\gamma^n$	$16,1484 \pm 7,4504$	$0,0676 \pm 0,2710$	$1,4258 \pm 0,9131$

Tabela 3: Coeficientes de determinação R^2 dos diferentes modelos reológicos testados.

Fluido	Newton	<i>Power-law</i>	Herschel-Bulkley	Bingham
F1	-17	0,8676	0,8589	0,8892*
F2	0,6603	0,8942	0,8948	0,9153*

*melhor resultado

A reologia dos fluidos comprovou a pseudoplasticidade das suspensões, visto que ocorreu um aumento da tensão de cisalhamento e o decréscimo da viscosidade

aparente em função do aumento da taxa de deformação, como pode ser observado na Figura 3.

É possível notar, na Figura 3, que ambos os fluidos demonstram possuir uma tensão de cisalhamento crítica, logo, os modelos de Herschel-Bulkley e Bingham tiveram bom desempenho em descrever o comportamento reológico dos fluidos. Entretanto, o modelo de Bingham foi levemente mais preciso, como evidenciado na Tabela 3. É fácil notar no modelo de Herschel-Bulkley que, quando $n = 1$, este se reduz ao modelo de Bingham, logo, por ter um parâmetro a menos a ser estimado, o modelo pôde ser ajustado mais facilmente.

O fato de ambos os fluidos possuírem uma tensão de cisalhamento crítica os classifica como fluidos não-Newtonianos do tipo Bingham. Juntamente com os modelos *power-law* e Herschel-Bulkley, este modelo está entre os mais comuns encontrados em campo (Mohamed *et al.*, 2021).

A Figura 4 apresenta a curva de escoamento dos fluidos F1 e F2. Comparando ambas as curvas, nota-se a maior inclinação da reta para F2. Este fato está ligado ao maior valor do parâmetro m na Tabela 1, que está diretamente associado com a viscosidade do fluido. Para uma mesma taxa de cisalhamento, a tensão exercida sobre o F2 foi maior que a exercida sobre o F1, ou seja, a tensão necessária para que se alcance um determinado grau de deformação será maior no fluido F2 comparada ao fluido F1.

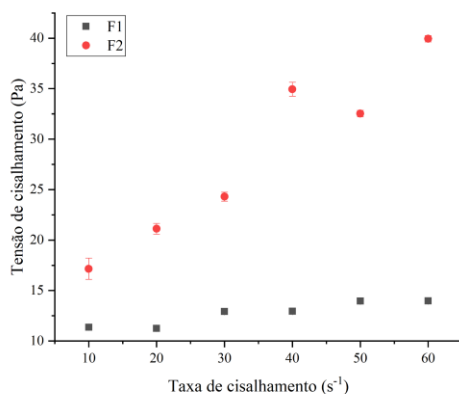


Figura 4: Curva de escoamento dos fluidos F1 e F2.

Atenuação de raios gamma

Os resultados do monitoramento da concentração de sólidos utilizando a técnica de atenuação de raios gama estão apresentados nas Figuras 5 e 6. Nestas figuras, observam-se várias curvas, uma para cada posição em z ,

sendo que cada curva apresenta um comportamento específico dentre dois possíveis (Kynch, 1952):

1. Partindo da concentração inicial, um grupo de curvas apresentou uma tendência de subida ao longo do tempo, indicando um aumento da concentração. Dado o processo de sedimentação, este comportamento era esperado para as posições mais baixas do eixo z , onde era esperado o acúmulo de partículas. Tanto para o fluido F1 (Figura 5) quanto para o fluido F2 (Figura 6) estas posições foram na faixa de $z = (0,5 \sim 12)$ cm.
2. Partindo da concentração inicial, um outro grupo de curvas inicia um processo de aumento da concentração porém, eventualmente, a concentração de sólidos cai rapidamente até chegar a zero. Este tipo de comportamento é esperado em regiões mais altas no eixo z , onde será formada uma região livre de sólidos, chamada pela literatura de zona de líquido clarificado. Tal zona se encontrou nas posições de $z = 16$ cm ou superiores para ambos os fluidos.

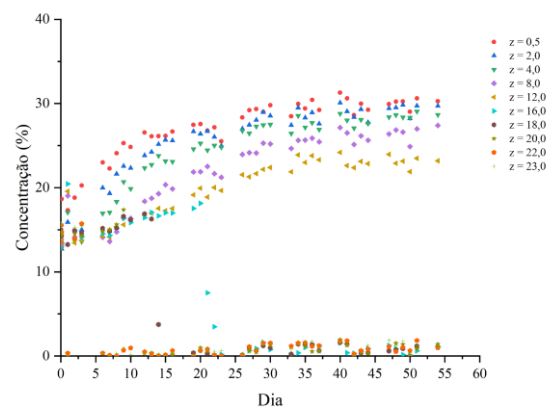


Figura 5: Curva de sedimentação para o fluido F1.

Um ponto interessante observado nas curvas para $z = (16; 18)$ cm é o registro da passagem da interface de separação sólido-líquido, representado pelos pontos em que a concentração está diminuindo. Na Figura 5, a passagem ocorreu entre os dias 15 e 23, aproximadamente. Já na Figura 6, o mesmo ocorreu logo no início do experimento, próximo ao dia 10. A passagem da interface

não é visível para as posições acima de $z = 18$ cm. Este fato evidencia dois pontos importantes.

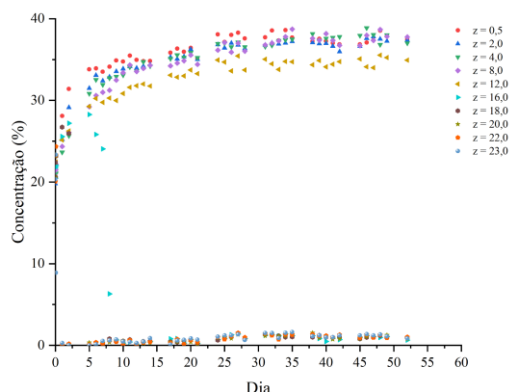


Figura 6: Curva de sedimentação para o fluido F2.

O primeiro ponto é que a separação de fases nestes fluidos começa muito cedo. De fato, foi observado uma separação logo nas primeiras horas de experimento.

O segundo ponto notado foi que o fluido F2 possui resistência à sedimentação menor que o fluido F1.

A menor resistência do fluido F2 também é observada pela taxa de variação das curvas ao longo do tempo. Nota-se, na Figura 6, que as curvas em uma determinada posição em z , nos dias iniciais, tiveram taxas de variação mais altas que para as mesmas posições na Figura 5.

CONCLUSÕES

Baseado neste estudo, as seguintes conclusões foram tiradas.

Ambos os fluidos puderam ser caracterizados como fluidos de Bingham. Ambos apresentaram tensão crítica de escoamento semelhante. Porém, o parâmetro m , associado com a viscosidade, foi maior para o fluido F2.

De acordo com a reologia dos fluidos, o fluido F1 demonstrou ter menor resistência à deformação que o fluido F2. Mesmo assim, durante a sedimentação, o fluido F1 foi capaz de sustentar os sólidos em suspensão por mais tempo que o fluido F2.

A altura do leito de sólidos alcançou um estado final similar para ambos os fluidos, permanecendo entre 12 e 16 cm, medidos a

partir da base do cilindro de ensaio. No entanto, a dinâmica da sedimentação foi significativamente diferente.

Considerando que os fluidos possuem a mesma formulação, diferenciada apenas pelo teor de CaCO_3 , pode-se dizer que a presença deste sólido em suspensão no fluido teve impacto, tanto na reologia quanto na sedimentação gravitacional.

Dada as funções que um fluido de perfuração deve ter e considerando apenas um momento em que o fluido esteja em repouso, o fluido F1 teve um melhor desempenho que o F2 em retardar a sedimentação.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer aos órgãos CAPES, CNPq, FAPEMIG e à empresa Petrobras pelo apoio financeiro e à Faculdade de Engenharia Química pela infraestrutura para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BIRD, R. B., STEWART, W. E., LIGHTFOOT, E. N., Transport Phenomena, 2ª ed. Wiley, New York, 2002.
- CHHABRA, R. P., Bubbles, drops and particles in non-newtonian fluids. 2. ed. [S.l.]: Taylor Francis Group, 2007.
- DAMASCENO, J. J. R., Uma contribuição ao estudo do espessamento contínuo. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 1992.
- FAGUNDES, F. M., Estudo da Estabilidade da Suspensão Constituinte do Fluido Br-Mul/Petrobras. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, UFU, Uberlândia, 2015.
- GANDELMAN, R. A., PINTO, G. H. V. P., Desenvolvimento de metodologia e correlações para previsão de perfil de concentração de sólidos durante a perfuração de poços de petróleo em períodos de estática. Boletim técnico da Produção de petróleo, v. 4, 2009.
- GARDNER, R. P.; ELY JR, R. P., Radioisotope measurement application

- in engineering. [S.l.]: Reinhold Publishing Corporation, 1967.
- GROWCOCK, F.; HARVEY, T., *Drilling Fluids Processing Handbook*. 2. ed. Elsevier, Inc., 2005.
- KYNCH, G. J., A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, v. 48, p.166–176, 1952.
- MELO, K. C., *Avaliação e Modelagem Reológica de Fluidos de Perfuração Base Água*, Natal/RN, Dissertação (Mestrado), 2008.
- MOHAMED, A., SALEHI, S., AHMED, R., Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review. *Geothermics*, v 93, 2021.
- MOREIRA, B. A., *Estudo da sedimentação em suspensões de fluidos com características reológicas pseudoplásticas*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, Brasil, 2014.
- PIRES, L. F., Soil analysis using nuclear techniques. a literature review of the gamma ray attenuation method. *Soil and Tillage Research*, v. 184, p. 216–234, 2018.
- SHAH, S. N.; SHANKER, N.; OGUGBUE, C. C., Future challenges of drilling fluids and their rheological measurements. In: . Well Construction Technology Center, University of Oklahoma: AADE-10-DF-HO-41, 2010.