



TÉCNICAS ALTERNATIVAS NO ESTUDO EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SEDIMENTAÇÃO DE MATERIAIS PARTICULADOS EM BATELADA

JULIANA M. DE SOUZA, ALLAN B. GEOFFROY MOTTA*, MOACYR N. BORGES FILHO,
EDUARDO DA CUNHA H. PARAÍSO, LUÍS A. CALÇADA, CLÁUDIA M. SCHEID ¹

¹Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química, Departamento de Engenharia Química

*e-mail: allanbgmotta@ufrj.br

RESUMO – Nos estudos de sedimentação de suspensões não opacas é possível acompanhar as fronteiras de sedimentação visualmente a partir da identificação das faixas de sedimentação apresentando claramente as regiões de clarificado, sedimentação livre e zona de compactação. Para suspensões opacas, como as formadas por fluidos de perfuração, técnicas indiretas são necessárias, como por exemplo técnicas com emissão de raios gama e posterior cálculo das concentrações. Este trabalho, apresenta uma técnica alternativa para a realização de experimentos de sedimentação com determinação da concentração dos sólidos em função do espaço e do tempo. A proposta é a aquisição de medidas feita por transmissores diferenciais de pressão ao longo da coluna de sedimentação que possibilitam o cálculo de concentrações médias para determinadas zonas, podendo ser utilizadas em fluidos opacos. O trabalho faz uma comparação com a técnica de condutividade elétrica, também desenvolvida no Laboratório de Escoamento de Fluidos da UFRRJ (LEF), para o estudo de sedimentação de fluidos de perfuração a base de água. A técnica por transmissão de pressão apresentou resultados promissores nos estudos experimentais de sedimentação de material particulado.

INTRODUÇÃO

No processo de perfuração de poços de petróleo utiliza-se fluidos de perfuração. Segundo a API (American Petroleum Institute, 1993), o fluido de perfuração é um fluido circulante que facilita e contribui para a operação de perfuração, e sua realização ocorre através de sondas, podendo ser a base água e base óleo. Os fluidos de perfuração são misturas complexas que contém insumos como líquidos, gases, materiais sólidos, viscosificantes e até sais. Os fluidos podem ser classificados de acordo com a resposta à tensão de cisalhamento aplicada, sendo denominados em Newtonianos e não-Newtonianos.

Fluidos de perfurações realizam funções importantes, tais como, o transporte de cascalhos, exercer pressão hidrostática no anular, lubrificar a broca e a coluna de perfuração (Bourgoyne *et al.*, 1986). Para que

suas funções sejam desempenhadas durante a perfuração é primordial o uso de aditivos. Um dos aditivos contidos no fluido é a Barita (BaSO₄), que possui algumas vantagens como baixo custo de produção e manuseio (Mahmoud *et al.*, 2017), baixo impacto ambiental, e é capaz de aumentar a densidade do fluido, porém, é um componente que dependendo de suas circunstâncias operacionais pode sofrer sedimentação.

O processo de sedimentação é uma operação unitária que consiste na separação gravitacional de sólidos-líquidos fundamentado na diferença de densidade das fases existentes na suspensão. Esta sedimentação é particularmente importante em fluidos de perfuração onde a deposição dos adensantes pode causar flutuações indesejáveis nas propriedades físicas dos fluidos (Eler, 2012).

Para analisar de forma quantitativa e qualitativa a sedimentação dos materiais adensantes, diversas técnicas podem ser

utilizadas. Testes de proveta e raios gama são técnicas usuais para entendimento do processo de sedimentação.

A técnica do ensaio de proveta permite realizar o monitoramento da altura da interface líquido clarificado-sedimentação livre com o tempo de maneira visual em casos de fluidos não opacos.

A técnica por atenuação de raios gamas é utilizada para o monitoramento da concentração volumétrica de sólidos como uma função do tempo. Este método é não invasivo, não destrutivo e a concentração é obtida pelo grau de atenuação da radiação medida quando feixes de fótons atingem o meio físico (Fagundes, 2015). A unidade experimental para a referente técnica exige equipamentos e radioisótopos importantes para a detecção de radiação. Fagundes (2015) utilizou o Am-241 como radioisótopo validando a eficácia de raios- γ para análise em sedimentação.

A obtenção de perfis de concentração por condutividade elétrica é uma alternativa que avalia a dinâmica da sedimentação e admite aquisitar a altura da suspensão em processo de sedimentação como uma função do tempo (Rocha, 2018). Nesta técnica, Rocha *et al.*, trabalhando no Laboratório de escoamento dos Fluidos (LEF/UFRRJ), observaram a passagem da interface através da eletro-condutividade ao longo do tempo e das regiões de sedimentação apontadas por Coe e Clavanger, (1916). O método por condutividade elétrica mostrou-se eficaz a depender da característica química e física da suspensão, uma vez que em presença de sal não há confiabilidade nos dados adquiridos para concentração de sólidos.

Para fins de comparação da técnica de condutividade elétrica com a de diferencial de pressão, a ser apresentada neste trabalho, a Figura 1 mostra os resultados obtidos por Rocha *et al.* (2022) para o experimento de sedimentação com suspensões de água e barita. Os resultados foram obtidos no monitoramento da condutividade elétrica em diferentes alturas ao longo da coluna.

No gráfico apresentado da Figura 1, a curva verde representa a leitura na altura de 7,25 cm acima da base da coluna. Observa-se que ela apresenta um aumento na concentração até um patamar aproximadamente constante, assim como a curva rosa que representa a altura

de 17,25 cm. Estas duas curvas indicam que a concentração na base aumenta pelo recebimento dos sólidos sedimentando até um valor constante. A curva azul, que representa a leitura obtida pelo eletrodo posicionado na altura de 27,25 cm, mostra uma queda na concentração até um patamar que apresenta a tendência de alcançar um regime constante, assim como as curvas preta e vermelha. A queda da concentração indica a passagem da frente de sedimentação.

O presente trabalho tem como objetivo investigar o processo de sedimentação em batelada, com apresentação de uma técnica que vem sendo utilizada no LEF/UFRRJ para o monitoramento da concentração de sólidos por diferencial de pressão e compará-la com a técnica de monitoramento por condutividade elétrica e o monitoramento visual da queda da interface. As técnicas podem ser aplicadas a fluidos de perfuração reais, que são intrinsecamente opacos, dificultando o acompanhamento visual da queda da interface superior.

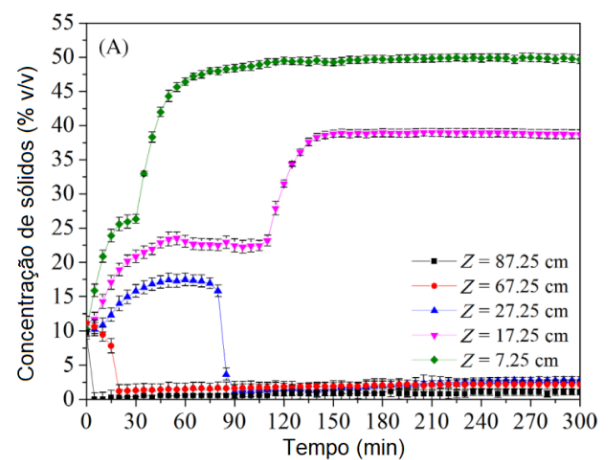


Figura 1: Monitoramento da concentração de sólidos por condutividade elétrica (adaptado de ROCHA *et al.*, 2022).

MATERIAIS E MÉTODOS

Unidade Experimental de Monitoramento de Sólidos

O Laboratório de Escoamento de Fluidos Giulio Massarani (LEF/UFRRJ) tem desenvolvido experimentos utilizando duas técnicas alternativas para o estudo da sedimentação, quais sejam: o monitoramento por condutividade elétrica, conforme o trabalho de Rocha *et al.* (2022), descrito na introdução,

e por diferencial de pressão ao longo da coluna de sedimentação.

Na realização dos experimentos para acompanhamento da evolução temporal da concentração de sólidos utilizou-se a unidade experimental, ilustrada na Figura 1. A coluna de sedimentação é constituída por um cilindro de acrílico com 97,25 cm de altura e 7,25 cm de diâmetro interno e possui 14 furos laterais, sendo que 5 aberturas são para inserção do sensor do transmissor de pressão.

Na Figura 2 tem-se uma representação esquemática da unidade experimental. Os pontos de aquisição dos transmissores de pressão estão indicados.

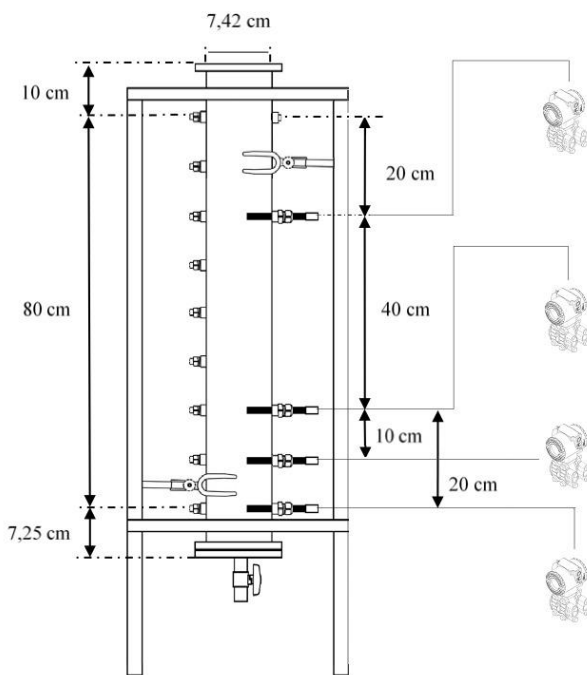


Figura 2: Representação esquemática da unidade experimental de monitoramento dos sólidos.

Transmissor Diferencial de Pressão

A aquisição dos dados referentes à leitura de pressão foi feita por meio de transmissores diferenciais de pressão. Os sensores em contato com o fluido são constituídos de transdutores, nos quais a pressão aplicada a diafragmas exerce uma variação da capacitância entre os mesmos e um diafragma central. Esta variação é usada para alterar a frequência de um oscilador.

O transmissor emite um sinal de corrente que é enviado para uma placa de aquisição de dados que converte a leitura de corrente e envia para o computador através de

uma porta USB. Um *software* de aquisição de dados foi criado utilizando a linguagem gráfica LabView para receber e tratar os dados. A leitura para cada transmissor é feita a cada um segundo, é exibida na tela e salva num arquivo. Os resultados são plotados em tempo real, mas também posteriormente via outro *software* em linguagem Python, que permite aplicar um novo filtro, além de fornecer outras ferramentas de manipulação tratamento de dados.

A Figura 3 apresenta uma foto da unidade experimental com os transmissores de pressão instalados. O canal 1 (CH1) é o sinal recebido pelo primeiro transmissor de pressão, que está localizado a uma altura de 66 cm medidos a partir da base da coluna. Já os canais 2 (CH2) e 3 (CH3), estão respectivamente localizados a 25 cm e 16 cm. O canal mais próximo da base, CH4, está a uma altura de 6 cm.



Figura 3: Imagem da unidade experimental de bancada de monitoramento dos sólidos.

A partir da pressão diferencial lida em cada transmissor, é calculada a massa específica da suspensão ρ_{susp} :

$$\rho_{susp_i} = \frac{\Delta p_i}{gz_i}, \quad (1)$$

onde Δp é o diferencial de pressão, g a aceleração da gravidade e z é a altura da coluna de fluido sobre o transdutor i analisado. Uma vez obtida a massa específica da suspensão pela Equação 1, a concentração média de sólidos ε_s (v/v) na coluna de fluido acima do transmissor é obtida por meio de uma regra de mistura, a partir da massa específica do sólido adensante ρ_s e do fluido sem a presença de sólidos ρ_l , que são parâmetros previamente conhecidos:

$$\varepsilon_{s_i} = \frac{\rho_{susp_i} - \rho_l}{\rho_s - \rho_l}. \quad (2)$$

Monitoramento Visual

Para fins de validação da metodologia por diferencial de pressão, foi feito o acompanhamento visual da dinâmica da interface superior para o caso estudado. Isso foi possível graças à característica não-opaca do fluido empregado, sendo este uma suspensão de água e barita. Um instrumento de medição de comprimento foi acoplado à coluna de sedimentação e as medidas de altura foram coletadas ao longo de intervalos de tempo pré-determinados, iniciando em um intervalo de 15 segundos até 20 minutos. A amostra da altura da interface em cada instante foi aferida visualmente. O teste foi realizado em triplicata para avaliar o erro experimental.

Condições de Teste

Para a análise da sedimentação dos sólidos, as concentrações de cada componente do fluido foram apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Dados da suspensão e do material adensante.

Base	Água (90% v/v)
Material Adensante	Barita (10% v/v)
Massa Específica	3,8 g/cm ³
Diâmetro Médio d(0,5)	14,44 μ m

Para a realização do experimento de sedimentação, o fluido foi preparado com o auxílio de um agitador da marca Fisatom, modelo 722, com velocidade rotacional de 540

rpm. Ao preparar o fluido adicionou-se em um recipiente 1710g de barita, material aferido na balança Shimadzu (modelo AUY 220), e posteriormente 4050 ml de água. Em seguida, levou-se até o agitador para que ocorresse a homogeneização do fluido de perfuração. O tempo pré-determinado de preparo da suspensão foi de 1 hora. Logo após este, o fluido foi vertido na coluna de acrílico da unidade experimental de bancada para monitoramento da concentração de sólidos através do diferencial de pressão ao longo da coluna.

RESULTADOS

A dinâmica da concentração de sólidos no processo de sedimentação foi analisada através do monitoramento por diferencial de pressão. A análise a seguir, permitiu acompanhar a evolução temporal do fenômeno.

Para os resultados da sedimentação, ao final do período de 6 horas coletou-se os dados no *software* e fez-se uso da técnica de monitoramento a partir da pressão hidrostática. Os dados foram filtrados para remover oscilações e novos gráficos foram gerados. Os resultados para a concentração de sólidos ao longo do tempo estão apresentados na Figura 4. O monitoramento com o uso da pressão nos permite avaliar a concentração de sólidos por meio da variação média da pressão, que ocorre devido à mudança na massa específica da suspensão.

Ao analisar a Figura 4a, para o canal 1 a uma altura de 66 cm e dotando como referência a base da coluna, observou-se a rápida queda da concentração de partículas em menos de 1 hora. Como a suspensão está completamente homogênea, assim que o fluido é vertido na coluna, já é observado o processo de sedimentação e a queda da interface superior, que inicialmente ocorre em velocidade relativamente alta, passando pela altura do transmissor 1 em menos de 10 minutos. Nos CH2, CH3 e CH4, constatou-se novamente uma queda da concentração e que por um período aparenta a tendência de um valor constante. No instante em que a curva adquire tal tendência, é entendido que ocorre a passagem da interface de sedimentação pelo transdutor em questão, ocorrendo primeiro em CH1, seguido por CH2,

CH3 e CH4 respectivamente, o que é esperado devido à altura de leitura de cada transmissor na coluna.

No transmissor 4 ocorreram pequenas oscilações, conforme pode ser visualizado na Figura 4-d. O resultado pode ser explicado pela movimentação das partículas que são depositadas na base da coluna de sedimentação formando uma região de compactação e o fluido, o qual o sólido ocupará o lugar, se desloca com velocidade ascensional, de acordo com a Figura 5.

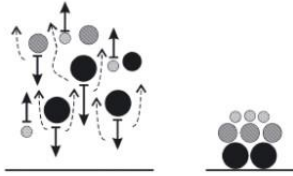


Figura 5: Representação esquemática da segregação das partículas em suspensões com concentrações iniciais de sólidos intermediárias (AMY *et al.*, 2006).

A Figura 6 mostra a queda da interface superior ao longo do tempo para os quatro pontos monitorados pelos transmissores de pressão e pelo monitoramento visual da interface. O comportamento é o esperado para

um processo de sedimentação. Os pontos obtidos em cada transmissor de pressão foram próximos aos obtidos pelo acompanhamento visual, exceto pelo transmissor 4. Uma possível causa para este resultado é a passagem da interface inferior entre a zona de compactação e de transição. O resultado ainda precisa ser investigado para que a hipótese seja confirmada. Ainda, a inserção de mais transmissores na coluna de sedimentação para o monitoramento do processo pode, portanto, permitir a obtenção de toda a curva de sedimentação.

Neste trabalho, também foi avaliado o processo de sedimentação tomando-se a queda de pressão entre dois transmissores de pressão. A Figura 7 apresenta o resultado para a evolução de concentração obtida através do diferencial de pressão entre os transmissores 1 e 2 e entre os transmissores 3 e 4. O monitoramento por diferencial permite obter informação sobre a queda das partículas sólidas na região delimitada entre os transdutores, tendo um aspecto mais local, diferente do apresentado anteriormente em que é monitorada a concentração de sólidos em toda coluna de fluido que está acima do transmissor.

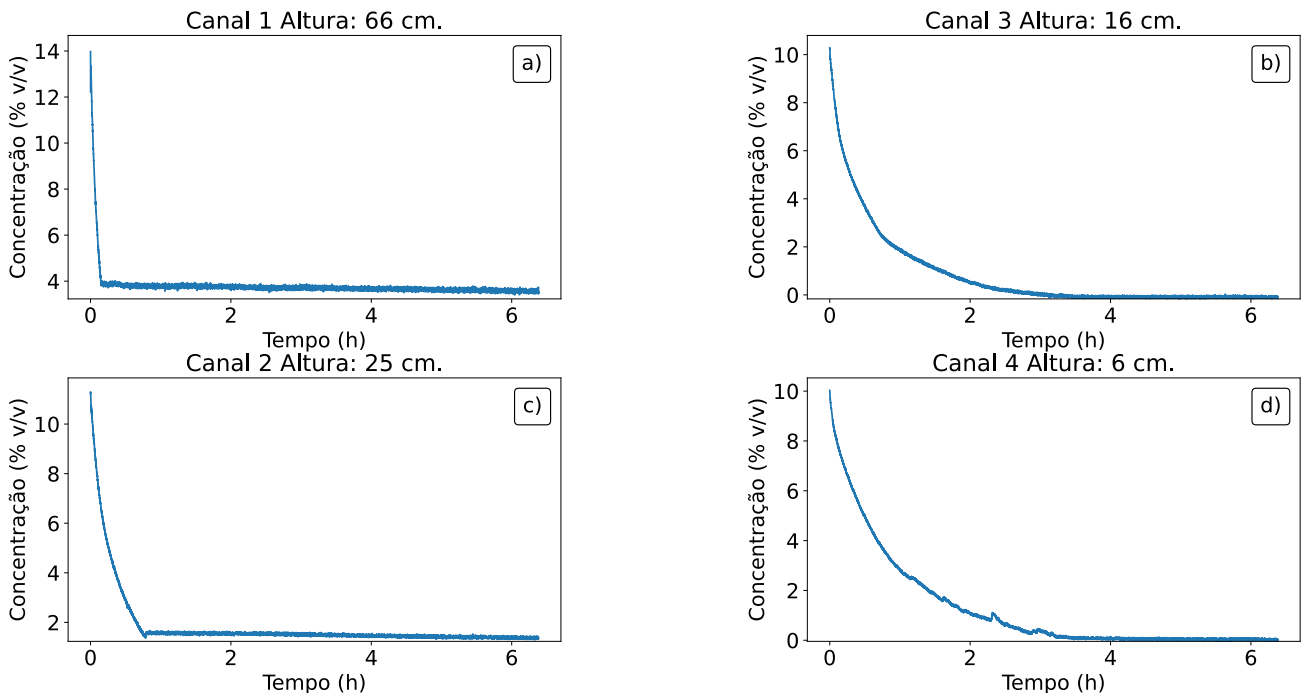


Figura 4: Dados de concentração por tempo. a) CH1 – transmissor 1; b) CH2 – transmissor 2; c) CH3 – transmissor 3; d) CH4 – transmissor 4.

Na curva em azul, que representa a região entre 66 cm e 25 cm medidos a partir da base da coluna, ocorre uma queda contínua na concentração. Este comportamento é esperado pois se trata da concentração numa região que compreende o meio e a parte superior da coluna, que tende apenas a perder partículas para a região inferior. Na curva laranja, que representa a região delimitada pelas alturas de 16 cm e 6 cm, há um aumento inicial na concentração, seguida por uma queda com oscilações. Esse aumento é explicado pelo fato de ser uma região mais próxima à base da coluna, inicialmente recebendo uma grande quantidade de partículas que se deslocam da parte superior da coluna. Em seguida, as partículas desta região continuam em queda para a região do compactado, que se formou abaixo do transmissor 4, causando uma queda na concentração.

Nota-se que no caso da curva azul a passagem da interface segue o perfil gráfico apresentado no canal 2 (CH2). Já na curva laranja, a passagem da interface coincide com o canal 4 (CH4). Ainda, como a técnica foi capaz de capturar o aumento de concentração médio no trecho analisado mais próximo da base, isto indica que uma maior aproximação dos transdutores pode fornecer uma leitura de concentração aproximadamente local.

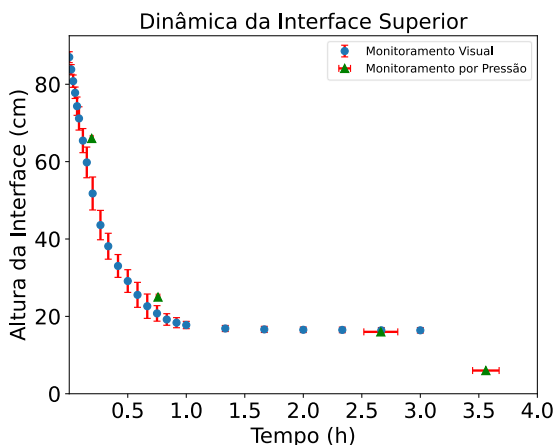


Figura 6: Queda da interface superior ao longo do tempo.

Fica evidente que a característica da técnica de monitoramento por diferencial de pressão fornece valores médios de concentração ao longo de um trecho da coluna, o que contrasta com a técnica por condutividade elétrica, que mede a concentração local.

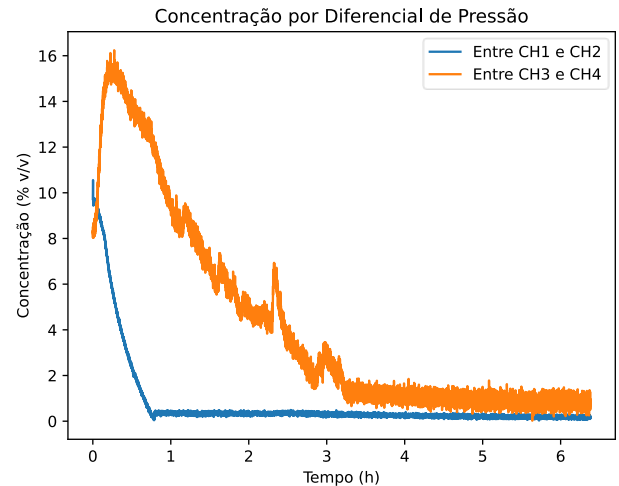


Figura 7: Evolução da concentração por diferencial de pressão.

CONCLUSÕES

O monitoramento da concentração de sólidos no processo de sedimentação por diferencial de pressão apresenta-se como alternativa viável frente à medição de concentração por outras técnicas já consagradas na literatura.

Nos resultados obtidos pela diferença de pressão entre os transmissores, é possível concluir que a técnica foi capaz de capturar o aumento de concentração médio no trecho analisado mais próximo da base, indicando que uma maior aproximação dos transdutores pode fornecer uma leitura de concentração aproximadamente local, se mostrando como uma alternativa viável para o monitoramento do processo de sedimentação para fluidos opacos e com a presença de sal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro e ao Laboratório de Escoamento de Fluido Giulio Massarani (LEF/UFRRJ) pela infraestrutura de pesquisa; ao CNPq e a CAPES pelas bolsas de Iniciação Científica e ao CENPES/PETROBRAS pelos recursos aportados no Projeto de Pesquisa No. 4600538013.

NOMENCLATURA

g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
z	Altura da coluna de fluido [m]
i	Transdutor analisado
ρ_l	Massa específica do líquido [kg/m ³]
ρ_s	Massa específica da sólido [kg/m ³]
ρ_{susp_i}	Massa específica da suspensão [kg/m ³]
Δp_i	Variação de pressão [Pa]
ε_{s_i}	Concentração de sólidos [v/v]

REFERÊNCIAS

- AMY, L. A., Talling, P. J., Edmonds, V. O., Sumner, E. J., & Lesueur, A. (2006). An experimental investigation of sand–mud suspension settling behaviour: implications for bimodal mud contents of submarine flow deposits. *Sedimentology*, 53(6), 1411-1434.
- BOURGOYNE Jr., A. T.; MILLHEIM, K. K.; CHENEVERT, M. E.; YOUNG Jr., F. S.. *Applied Drilling Engineering*. Richardson: SPE Textbook, 1986;
- B.S. Ba geri, M. Mahmoud, A. Abdulraheem, S.H. Al-Mutairi, S.M. Elkatatny, R.A. Shawabkeh (2017), Single stage filter cake removal of barite weighted water based drilling fluid, *J. Pet. Sci. Eng.* 149 (2017) (2017) 476–484. [16] P.A. Bern, E. Van Oort, B. Neustadt, H. Ebeltoft, C. Zurdo, M. Zamora, K.S. Slater, Barite
- CALÇADA, L. A., Scheid, C. M., Meleiro, L. A., Ribeiro, J. M., Seufitelli, G. V., Peliano, S. V., ... & Martins, A. L. (2016, September). Barite sag and its impact on annular pressure build up mitigation in producing offshore wells. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. OnePetro.
- COE HS, Clevenger GH. Methods for determining the capacities of slime-settling tanks. *Trans Am Inst min Eng.* 1916;55:356-384.
- ELER, F.M. (2012) Estudo de Sedimentação da Barita em Fluidos de perfuração. Disponível em < Dissertação-Eler.pdf (ufrj.br)> acessado em 18 de abril de 2022;
- FAGUNDES, F. M. Estudo da Estabilidade da Suspensão Constituinte do Fluido BrMul/Petrobras. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2015.
- OMLAND, T. H. (2009) Particle settling in non-Newtonian drilling Fluids. Dissertação de Ph.D. University of Stavanger, Faculty of Science and Technology, Department of Petroleum Engineering, 2009.
- RAPOSA Rocha, R., Francisco Oechsler, B., Scheid, C. M., Calçada, L. A., & Meleiro, L. A. (2022). Electrical conductivity measurements and the nonhomogeneous settling behavior of aqueous suspensions of barite. *AIChE Journal*, 68(5), e17600.
- SILVA, B., R., A. Avaliação da Filtração de Fluidos de Perfuração Não Newtonianos Utilizando a Teoria Simplificada da Filtração, 2017.
- VARGO, R. F., Payne, M., Faul, R., LeBlanc, J., & Griffith, J. E. (2003). Practical and successful prevention of annular pressure buildup on the Marlin project. *SPE drilling & completion*, 18(03), 228-234.
- ZAMORA, M.; BELL, R. (2004) Improved Wellsite Test for Monitoring Barite Sag. *AADE-04-DFHO-19, AADE Drilling Fluids Technical Conference*, Houston, Texas, 2004.