

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



## TÍTULO DO TRABALHO:

BENTONITAS DE DIFERENTES ORIGENS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DO FLUIDO AQUOSO MINERAL EMPREGADO COMO BARREIRA DE SEGURANÇA NO ABANDONO TEMPORÁRIO DE POÇOS DE PETRÓLEO

## AUTORES:

Daniella Silva Leal; Victoria Bezerra Romualdo; Karine Castro Nóbrega; Waleska Rodrigues Pontes da Costa; Luciana Viana Amorim

## INSTITUIÇÃO:

Laboratório de Pesquisa em Fluidos de Perfuração (Peflab) / Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

## **BENTONITAS DE DIFERENTES ORIGENS E SUA INFLUÊNCIA NO DESEMPENHO DO FLUIDO AQUOSO MINERAL EMPREGADO COMO BARREIRA DE SEGURANÇA NO ABANDONO TEMPORÁRIO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

### **Resumo**

O abandono é uma consequência natural das operações de produção do poço e mesmo não sendo um procedimento que gere receita para companhia, é imprescindível que seja feito com responsabilidade. Assim, o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa de diferentes tipos de amostras de bentonita no desempenho de fluidos aquosos minerais utilizados como barreira de segurança líquida no abandono de poços de petróleo, assim como avaliar a viabilidade de substituição da bentonita atualmente utilizada no Fluido-base desenvolvido para abandono de poços. Para isso foram utilizadas 5 amostras de bentonita de diferentes origens, as quais foram caracterizadas por meio do ensaio de inchamento de Foster. O desempenho dos fluidos foi monitorado por meio de medidas de pH e densidade, análise do comportamento reológico e do volume de filtrado em condições HPHT. Os resultados evidenciaram que: (i) as amostras de bentonita apresentaram alto inchamento, comprovando seu caráter sódico; (ii) os fluidos estudados apresentaram pH com caráter básico; e (iii) os valores de densidade, os parâmetros reológicos e os volumes de filtrado dos fluidos, independente da amostra de bentonita utilizada em seu preparo, não apresentaram variações significativas, sendo condizentes com os do Fluido-base. Conclui-se que todos os fluidos preparados com as diferentes amostras de bentonita apresentaram resultados satisfatórios quando comparados ao Fluido-base já utilizado e aprovado, podendo assim, ser substituído por qualquer amostra estudada.

Palavras-chave: Barreira líquida, CSB, reologia.

### **Abstract**

Abandonment is a natural consequence of well production operations and, although it does not generate revenue for the company, it is essential to be conducted responsibly. Therefore, the aim of this study is to conduct a comparative analysis of different bentonite samples in the performance of mineral aqueous fluids used as a liquid barrier safety measure in oil well abandonment, as well as to evaluate the feasibility of replacing the currently used bentonite in the base fluid developed for well abandonment. Five samples of bentonite from different sources were characterized using the Foster swelling test. The performance of the fluids was monitored through pH and density measurements, rheological behavior analysis, and HPHT filtration volume. The results showed that: (i) the bentonite samples exhibited high swelling, confirming their sodium-based nature; (ii) the studied fluids had a basic pH character; and (iii) the density values, rheological parameters, and filtration volumes of the fluids, regardless of the bentonite sample used, showed no significant variations, consistent with those of the base fluid. It is concluded that all fluids prepared with the different bentonite samples showed satisfactory results compared to the already used and approved base fluid, indicating that any studied sample could potentially replace the current one.

Keywords: Liquid barrier, CSB, rheology.

## Introdução

O ciclo de vida de um poço de petróleo abrange várias etapas cruciais, desde o planejamento inicial até o seu encerramento. A princípio, ocorre a etapa de projeto seguida pela perfuração, produção, intervenção, e por fim, o abandono. Este refere-se à última atividade da cadeia produtiva petrolífera de exploração e produção, e assim como as demais fases requer planejamento e cuidado (Sobrinho, 2016).

As operações de abandono de poço, comumente conhecidas na indústria como *Plugging & Abandonment* (P&A), têm como objetivo principal restaurar a integridade da formação rochosa que atua como rocha capeadora do reservatório, mantendo a integridade do poço permanentemente (Aas *et al.*, 2016). Segundo a Portaria N°25, de 06 de março de 2002, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) define o abandono de poço como uma série de operações destinadas a assegurar o isolamento das zonas de petróleo e gás, assim como a de zonas com aquíferos, a fim de prevenir a migração de fluidos entre as formações, seja pelo poço ou pelo espaço anular entre o poço e o revestimento, bem como para a superfície do terreno ou fundo do mar.

Do ponto de vista econômico, o abandono de poços é uma atividade que acarreta custos consideráveis e variáveis, dependendo da complexidade envolvida no projeto. Portanto, é fundamental realizar um planejamento adequado das operações de abandono, incluindo estudos preliminares abrangentes (Montenegro e Costa Júnior, 2020).

Nos últimos anos, houve um foco crescente no desenvolvimento de novos materiais utilizados como Conjunto Solidários de Barreira (CSB), especialmente na busca por alternativas às barreiras mecânicas tradicionais. Uma abordagem emergente é o conceito de barreiras líquidas, que envolvem o uso de colunas de fluido com pressão hidrostática adequada para conter os fluidos presentes em intervalos permeáveis e impedir seu fluxo em direção ao poço. A escolha dos tipos de materiais utilizados, como tipo de argila e aditivos, bem como a formulação correta desses fluidos desempenha papel crucial no desempenho da atividade de abandono.

Atualmente, o Laboratório de Pesquisa em Fluidos de Perfuração (Peflab) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) tem se dedicado a investigar alternativas de materiais para o processo de abandono de poços de petróleo. Como parte desses esforços, foi desenvolvido um Fluido-base utilizando argila bentonítica proveniente da Bahia, selecionada devido às suas propriedades físico-químicas aprimoradas, incluindo pH, densidade, volume de filtrado e parâmetros reológicos. No entanto, devido aos desafios logísticos associados à obtenção deste argilomineral, surge a necessidade de explorar amostras de bentonita de diversas origens. Assim, o objetivo deste estudo é realizar uma análise comparativa de amostras de bentonita de diferentes origens no desempenho de fluidos aquosos minerais utilizados como barreira de segurança líquida no abandono de poços de petróleo, assim como avaliar a viabilidade de substituição da bentonita atualmente utilizada no Fluido-base desenvolvido para abandono de poços.

## Materiais e Métodos

### Materiais

Para o desenvolvimento deste trabalho foram estudadas 6 amostras de argilas bentoníticas de diferentes origens. A identificação adotada para cada uma dessas amostras, empresa fornecedora e local de origem, encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Identificação das amostras de bentonitas.

| Amostra     | Amostra-Base                      | Amostra 1      | Amostra 2      | Amostra 3 | Amostra 4     | Amostra 5                     |
|-------------|-----------------------------------|----------------|----------------|-----------|---------------|-------------------------------|
| Empresa     | Companhia Brasileira de Bentonita | Bentonisa      | Bentonisa      | SI        | SI            | Bentonit União Nordeste (BUN) |
| Procedência | Vitória da Conquista - BA         | Boa Vista (PB) | Argentina (AR) | SI        | Wyoming (EUA) | Boa Vista (PB)                |

\*SI – Sem identificação.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Além da bentonita foram utilizados para formulação do fluido: água deionizada, antiespumante, bicarbonato de sódio, PAC-LV, NaOH, MgO, Salmoura de NaCl, Glutaraldeído e Calcário 2-44.

## Métodos

### Inchamento Foster

Este ensaio foi realizado segundo a metodologia proposta por Foster (1953). O ensaio consistiu em adicionar, lentamente, 1g da amostra de argila em 50ml do solvente (água deionizada), contida em uma proveta. Em seguida, o sistema foi deixado em repouso por 24h, para só então realizar a medida do volume ocupado pela argila, em mL.

### Preparação do fluido

Os fluidos estudados foram preparados em um agitador *Hamilton Beach*. O preparo do fluido consiste, primeiramente, em uma pré-hidratação da bentonita onde parte dos aditivos são adicionados ao copo do equipamento e agitados durante 5 min, entre a adição de cada componente, em velocidade alta. Em seguida a mistura é deixada em repouso por cerca de 16h. O fluido é finalizado após o tempo de repouso e a adição dos demais aditivos. Ao final do preparo, o fluido ficou sob agitação em média por 45 min. Uma vez que esse estudo compreende a formulação do fluido depositado no Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI) sob número BR 10 2023 019391 9, optou-se por não divulgar a formulação e os teores de cada aditivo.

### Determinação do pH

Para determinação do pH dos fluidos estudados, foi utilizado o pHmetro da marca Linelab modelo PH Plus.

### Determinação da densidade

A densidade de cada fluido, em lb/gal, foi medida por meio de uma balança densimétrica FANN – modelo 140.

### Reologia: Viscosímetro

As propriedades reológicas dos fluidos foram obtidas a partir dos ensaios realizados no viscosímetro FANN, modelo 35A, de acordo com a norma 13A da *American Petroleum Institute* (API) (API, 2010).

A partir das leituras de deflexão, de  $G_i$  e  $G_f$ , foram calculados os valores da Viscosidade Aparente (VA), Viscosidade Plástica (VP), Limite de Escoamento (LE) e Força Gel (FG), por meio das equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente.

$$VA = L600 / 2 \quad (1)$$

$$VP = L600 - L300 \quad (2)$$

$$LE = L300 - VP \quad (3)$$

$$FG = G_f - G_i \quad (4)$$

## Determinação do volume de filtrado HPHT

O volume de filtrado dos fluidos analisados foi determinado em filtro prensa HPHT (*High pressure High Temperature*) da marca FANN série 387, segundo os procedimentos especificados pela Norma ISO 10414: 2008, da *American Petroleum Institute* (2008). O ensaio foi realizado a 150°F (65,6°C) e sob pressão de 300psi, durante um tempo total de 30 minutos, em que no final deste tempo foi realizada a leitura do volume de filtrado contido na proveta, em mL.

## Resultados e Discussão

### Inchamento Foster

Na Tabela 1, é possível verificar os resultados obtidos no teste de inchamento Foster das amostras de argila utilizadas.

**Tabela 1** – Resultados do teste de inchamento Foster.

| Amostra           | Amostra-Base | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 4 | Amostra 5 |
|-------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Inchamento (mL/g) | 12           | 21        | 16        | 12        | 14        | 16        |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

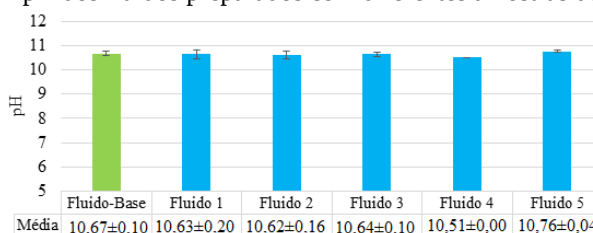
Verifica-se por meio da Tabela 1, que a Amostra-Base apresentou um inchamento de 12 mL/g, o que segundo Foster (1953) é considerado um inchamento alto. As demais amostras também apresentaram inchamento significativo, sendo esses acima de 8 mL/g, o que as caracterizam como amostras com alta capacidade de inchamento.

Os resultados obtidos no teste de inchamento de Foster comprovam o caráter sódico das bentonitas, uma vez que, todas as amostras apresentaram alto inchamento.

## pH

Na Figura 1, encontram-se apresentados os valores de pH registrados para os fluidos preparados com diferentes amostras de bentonita.

**Figura 1** – pH dos fluidos preparados com diferentes amostras de bentonita.



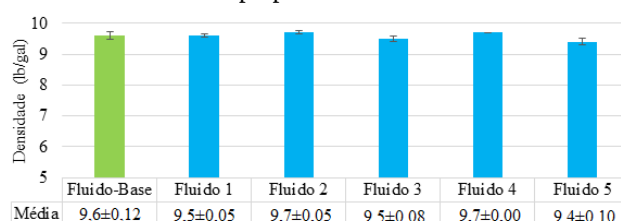
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Segundo Thomas (2001), a acidez ou alcalinidade dos fluidos de perfuração é expressa por indicadores de pH. Esses parâmetros devem se manter em um intervalo alcalino baixo, ou seja, de 7 a 10, a fim de reduzir a taxa de corrosão dos equipamentos. De acordo com os resultados apresentados na Figura 1, todos os fluidos preparados apresentaram caráter básico, com pH variando entre 10,51 e 10,76. Além disso, verificou-se que os valores de pH dos Fluidos 1, 2, 3, 4 e 5 tiveram pouca variação quando comparadas com o Fluido-base, sendo estes entre -1,5 e +0,84%.

## Densidade

Os resultados de densidade registrados para os fluidos estudados encontram-se dispostos na Figura 2.

**Figura 2** – Densidade dos fluidos preparados com diferentes amostras de bentonita.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A densidade é uma das propriedades dos fluidos que ajuda manter a estabilidade da parede do poço por meio da pressão hidrostática, além disso regula o volume de fluido filtrado para as formações geológicas (Petrobras, 1991). De acordo com os resultados obtidos e apresentados na Figura 2, verifica-se que todos os fluidos apresentaram valores próximos ao do Fluido-base, com variações entre -2,08 e +1,04%. No entanto, esses resultados eram esperados, uma vez que todos os fluidos foram preparados utilizando a mesma formulação do Fluido-base. Isso sugere que as diferentes amostras de bentonitas utilizadas no estudo não exerceram uma influência significativa na densidade dos fluidos.

## Reologia

Na Tabela 2, encontram-se as médias da Viscosidade Aparente (VA), Viscosidade Plástica (VP), o Limite de Escoamento (LE) e a Força Gel (FG), para cada fluido preparado.

**Tabela 2** – Reologia dos fluidos preparados com diferentes amostras de bentonita.

|                  | Fluido-Base | Fluido 1  | Fluido 2 | Fluido 3 | Fluido 4 | Fluido 5 |
|------------------|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>VA (cP)</b>   | 116±5,89    | 127±9,43  | 90±3,93  | 116±6,45 | 127±0    | 123±4,55 |
| <b>VP (cP)</b>   | 67±7,04     | 64±4,22   | 57±2,91  | 65±5,02  | 62±0     | 67±1,79  |
| <b>LE (N/m²)</b> | 165±4,36    | 190±14,79 | 123±5,14 | 166±8,55 | 129±0    | 179±7,39 |
| <b>FG (N/m²)</b> | 29±5,89     | 31±6,27   | 13±3,14  | 36±8,94  | 39±0     | 55±6,26  |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

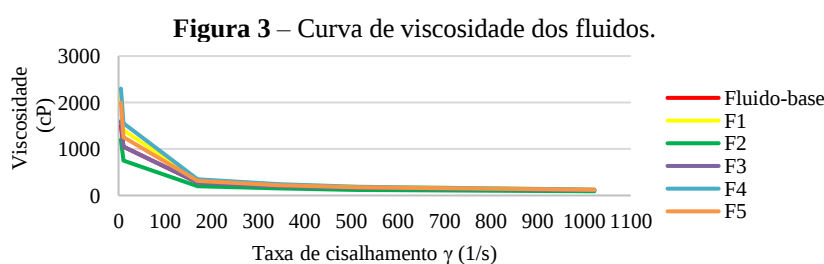
Ao analisar a Tabela 2, verifica-se que de modo geral todos os fluidos, com exceção do Fluido 2, apresentaram valores próximos aos do Fluido-base. Os valores da Viscosidade Aparente (VA) e Viscosidade Plástica (VP), medem a resistência do fluido ao fluxo e a resistência inicial ao iniciar o fluxo, respectivamente (Machado, 2002). Verifica-se que os valores de VA variaram entre 90cP (Fluido 2) e 127cP (Fluido 4), representando uma variação percentual de -28,9 e +9,5%, quando comparados ao

Fluido-base. Já a VP apresentou valores variando entre 57cP (Fluido 2) e 67cP (Fluido 5), apresentando pouca ou quase nenhuma variação quando comparadas ao Fluido-base.

Em relação ao Limite de Escoamento (LE), verifica-se, que os fluidos estudados apresentaram medidas variando entre 123 N/m<sup>2</sup> (Fluido 2) e 190 N/m<sup>2</sup> (Fluido 1), o que representa uma variação de -25,4 e +15,2%, respectivamente quando comparados ao Fluido-base. Segundo Amorim, Barbosa e Ferreira (2008), valores altos de LE podem resultar do elevado teor de sólidos presentes em sua composição, pois quanto maior o teor de sólidos, maior a tensão cisalhante necessária para que se inicie o escoamento.

A leitura da Força Gel (FG) dos fluidos permite avaliar a sua tixotropia, que é o aumento da viscosidade no estado de repouso e diminuição quando submetido a uma tensão de agitação (Machado, 2002). Verifica-se por meio dos resultados que os fluidos ensaiados apresentam tixotropia e tiveram valores variando entre 13 N/m<sup>2</sup> (Fluido 2) e 55 N/m<sup>2</sup> (Fluido 5), o que representa uma variação percentual de -55,2 e +89,7%, se comparados ao Fluido-base. A tixotropia é um comportamento importante, pois garante a gelificação e evita sedimentação das partículas do fluido (Santos, 2012).

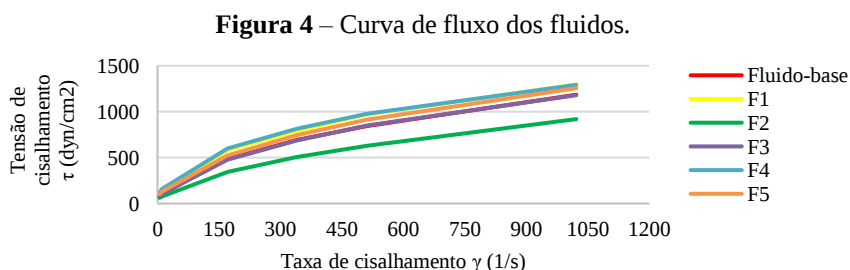
A Figura 3, apresenta as curvas de viscosidade em função da taxa de cisalhamento dos fluidos estudados.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A partir da curva de viscosidade apresentada na Figura 3 é possível verificar que as viscosidades de todos os fluidos diminuem com o aumento da taxa de cisalhamento. Esse comportamento é característico de sistemas pseudoplásticos. Pileggi, Pandolfelli e Studart (2000), justifica esse comportamento pelo fato das partículas dispersas nos sistemas pseudoplásticos, em repouso, estarem de forma irregular, proporcionando ao fluido uma alta resistência ao fluxo caracterizada pela alta viscosidade e com o aumento do cisalhamento essas partículas se orientam linearmente na direção do fluxo, diminuindo assim sua viscosidade.

A Figura 4, apresenta as curvas de consistência, ou curvas de fluxo, para os fluidos preparados com as diferentes amostras de bentonita.

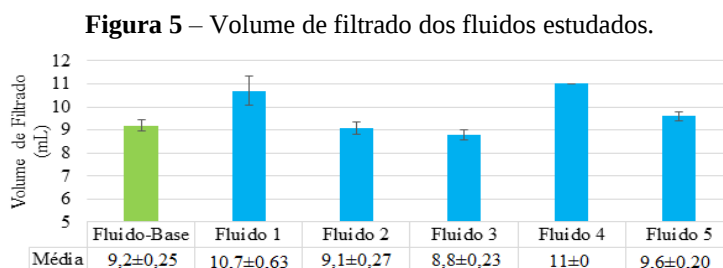


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As curvas de fluxo consistem em verificar o comportamento do fluido frente as mudanças da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação. A partir do comportamento, pode-se verificar a classificação dos fluidos (Bezerra Junior., 2020). A partir da análise da Figura 4, constatou-se que os fluidos preparados são não-newtonianos e apresentam comportamento pseudoplástico.

## Volume de Filtrado

Os resultados obtidos de volume de filtrado dos fluidos preparados com diferentes amostras de bentonita, encontram-se dispostos na Figura 5.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com base nos resultados apresentados na Figura 5, é possível notar que os fluidos produzidos apresentaram valores de volume de filtrado variando entre 8,8 (Fluido 3) e 11mL (Fluido 4), o que representa uma variação percentual de -4,3 e +19,6%, se comparado com o Fluido-base (9,2mL).

Ao analisar os valores de viscosidade reportados na Tabela 2 e os valores de volume de filtrado apresentados na Figura 5, verifica-se que quando comparados ao Fluido-base, os fluidos que apresentaram maior viscosidade (Fluido 1 e 4) apresentaram maior volume de filtrado, enquanto o fluido que se mostrou menos viscoso (Fluido 3) apresentou menor volume de filtrado. Esse comportamento pode estar relacionado com o grau de interação das partículas, o que pode justificar tal comportamento.

## Conclusões

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa de bentonita de diferentes origens no desempenho de fluidos aquosos minerais utilizados como barreira de segurança líquida no abandono de poços de petróleo e avaliar a viabilidade de substituição da bentonita atualmente utilizada no Fluido-base desenvolvido para abandono de poços, pode-se concluir que de modo geral todos os fluidos apresentaram desempenho satisfatório em comparação com o Fluido-base atualmente utilizado, sugerindo que são viáveis para substituir a bentonita atualmente utilizada.

## Agradecimentos

Agradecemos a Petrobras pelo apoio financeiro à pesquisa, por meio do projeto TC N° 0050.0120134.21.9 e as empresas colaboradoras, Bentonisa e Bentonit União Nordeste (BUN), que forneceram algumas amostras de bentonita.

## Referências Bibliográficas

AAS, B., SØRBØ, J., STOKKA, S., SAASEN, A., STATOIL, RG, LUNDE, Ø., ... & VRÅLSTAD, T.. Colocação de cimento com tubo deixado no furo durante operações de tamponamento e abandono. In: Conferência e Exposição de Perfuração SPE/IADC . SPE, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP), "Portaria 25/2002: Procedimentos a Serem Adotados no Abandono de Poços e Petróleo e/ou Gás", Rio de Janeiro, ANP, 06/mar/2002. Disponível em: < <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=184466>>. Acesso em: 10 de abr. 2024.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API 13A: Specification for Drilling Fluids Materials: API, 2010.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. ISO 10414-1: Petroleum and natural gas industries – Field testing of drilling fluids, 2008.

AMORIM, L. V.; BARBOSA, M. I. R.; FERREIRA, H. C. Desenvolvimento de compostos bentonita/polímeros para aplicação em fluidos de perfuração: Parte 2. Revista Matéria. v. 13, n. 1, pp. 20, 2008.

BEZERRA JUNIOR, A. C.. Avaliação do volume de filtrado e formação do reboco de fluidos de perfuração microemulsionados. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2020.

FOSTER, M. D. Geochemical studies of clay minerals: II—relation between ionic substitution and swelling in montmorillonites. American Mineralogist: Journal of Earth and Planetary Materials, v. 38, n. 11-12, p. 994-1006, 1953.

MACHADO, J. C. V. Reologia e Escoamento de Fluidos - Ênfase na Indústria do Petróleo, ed. Interciência, 2002.

MONTENEGRO, T. S., & JUNIOR, M. A. C.. Utilização de poços de petróleo abandonados para a produção de energia geotérmica. Caderno de Graduação-Ciências Exatas e Tecnológicas-UNIT-SERGIPE, v. 6, n. 2, p. 37-37, 2020.

PETROBRAS. Manual de Fluidos de Perfuração. Rio de Janeiro, CENPES, 1991.

PILEGGI, R. G., PANDOLFELLI, V. C., & STUDART, A. Dispersão e Empacotamento de Partículas. Editora Fazendo Arte, São Paulo, 2000.

SANTOS, M. R. M. Análise reológica de fluidos de perfuração. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação)-Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

SOBRINHO, N. N. A. Abandono permanente de poços petrolíferos: comparativo entre a portaria ANP nº 25/2002 e o novo regulamento do sistema de gerenciamento da integridade de poços (SGIP) publicado no DOU em 3.11.16. Trabalho de conclusão de curso – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, novembro de 2016.

THOMAS, J. E. Fundamentos de engenharia de petróleo, 2ª edição, Editora Interciência, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.