



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**



LEONARDO CAETANO MARCONDELLI

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DOS FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO**

UBERLÂNDIA

2022

LEONARDO CAETANO MARCONDELLI

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DOS FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO DOS POÇOS DE PETRÓLEO**

Monografia de graduação apresentada à
Universidade Federal de Uberlândia como parte
dos requisitos necessários para a aprovação na
disciplina Trabalho de Conclusão de curso, do
curso de Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca

UBERLÂNDIA

2022

ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Uberlândia, 19 de agosto de 2022

Monografia aprovada para a disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Química, da Universidade Federal de Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada por:

Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, FEQUI/UFU (Orientador)

Adam Basílio, FEQUI/UFU (Co-orientador)

Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato, FEQUI/UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, à minha mãe Renata e meu pai Celso pela constante prontidão, paciência, exemplos de honestidade e disciplina, e por terem investido na minha formação.

Agradeço a Deus pela oportunidade de contribuir um pouco para a Engenharia Química depois de anos de estudo, dedicação e muita aprendizagem.

Agradeço aos professores que dedicam a vida à nobre missão de construir nos outros a capacidade de se superarem, desenvolverem e aprenderem. Em especial ao Professor Fábio Arouca pela confiança, oportunidade e amizade.

Agradeço ao doutorando Adam Basílio pela contribuição, orientação, disponibilidade, e por acompanhar meu trabalho de perto com o auxílio necessário e pela amizade.

Agradeço a todos os amigos que me fortaleceram no dia a dia, em especial, aos amigos Guilherme Facchini, Augusto Azevedo e Aline Ribeiro que mesmo longe, sempre estiveram ao meu lado, e ao Alberto Mazario, que desde o início do curso, sempre me apoiou.

“A conquista é um acaso que talvez dependa mais das falhas dos vencidos do que do gênio do vencedor.”

RESUMO

Nos últimos anos, o petróleo no Brasil teve uma expansão significativa tanto no setor nacional quanto no contexto internacional, tendo uma grande relevância para o desenvolvimento socioeconômico do Brasil. Para obter essa matéria-prima, deve-se utilizar processos de perfuração de poços de petróleo, em que é utilizado fluidos de perfuração com características específicas para fazer o carreamento de partículas geradas pela broca até a superfície. O presente trabalho tem como objetivo estudos reológicos dos fluidos de perfuração e uma análise comparativa da sedimentação de dois fluidos de perfuração (fluido F1 e fluido F2) por meio da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG). Esta técnica, por ser não destrutiva, permitiu o monitoramento indireto da concentração volumétrica de sólidos em longos períodos de experimentos de sedimentação. Para a reologia, caracterizou-se o comportamento reológico dos fluidos através da curva de reologia e análise da dependência do tempo, utilizando o viscosímetro Brookfield, modelo DV2TLV, com acoplamento para amostras pequenas e geometria cone rotativo e placa fixa. Assim, verificou-se, tanto pelo comportamento reológico como também pelo monitoramento da sedimentação, que os fluidos puderam ser caracterizados por modelos matemáticos e que o fluido F1, para um momento em que o fluido esteja em repouso, teve um melhor desempenho na sedimentação.

Palavras-chave: reologia, atenuação de raios gama, fluido de perfuração, sedimentação.

ABSTRACT

In recent years, oil in Brazil has had a significant expansion both in the national sector and in the international context, having a great relevance for the socio-economic development of Brazil. To obtain this feedstock, drilling processes of oil must be used, which drilling fluids with specific characteristics are used to carry particles generated by the drill to the surface. The present work aims at rheological studies of drilling fluids and a comparative analysis of the sedimentation of two drilling fluids (fluid F1 and fluid F2) using the Gamma-Ray Attenuation Technique (TARG). This technique, for being non-destructive, allowed the indirect monitoring of the volumetric concentration of solids in long periods of sedimentation experiments. For rheology, the rheological behavior of fluids was characterized through the rheology curve and time dependence analysis, using the Brookfield viscometer, model DV2TLV, with coupling for small samples and rotating cone geometry and fixed plate. Therefore, it was verified, both by the rheological behavior and also by the sedimentation monitoring, that the fluids could be characterized by mathematical models and that the F1 fluid, for a moment when the fluid is at rest, had a better performance in the sedimentation.

Keywords: reology, gamma ray attenuation, drilling fluid, settling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Ilustração das profundidades das reservas de petróleo e gás natural exploradas pela Petrobras S.A.	1
Figura 2.1 Classificação reológica dos fluidos.	5
Figura 2.2 Curvas de escoamento e de viscosidade características de um fluido newtoniano em temperatura e pressão constantes.	6
Figura 2.3 Reograma geral para fluidos newtonianos e não-newtonianos	8
Figura 2.4 Ilustração do comportamento tixotrópico e reopético de um fluido quando submetido à deformação constante.	10
Figura 2.5 Ilustração do comportamento tixotrópico e reopético de um fluido.	11
Figura 3.1 Viscosímetro Brookfield.	14
Figura 3.2 Princípio de funcionamento do viscosímetro.	15
Figura 3.3 Ilustração da unidade de aplicação de radioisótopos.	17
Figura 4.1 Curvas das respostas reológicas referente ao fluido F1.	19
Figura 4.2 Curvas das respostas reológicas referente ao fluido F2.	19
Figura 4.3 Curva de Escoamento do Fluido 1.	20
Figura 4.4 Curva de Escoamento do Fluido 2.	21
Figura 4.5 Curva de escoamento dos fluidos F1 e F2.	21
Figura 4.6 Curva de sedimentação para o fluido F1.	23
Figura 4.7 Curva de sedimentação para o fluido F2.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Parâmetros do fluido F1 estimados para os diferentes modelos reológicos. 22

Tabela 4.2: Parâmetros do fluido F2 estimados para os diferentes modelos reológicos. 22

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	Reologia de Fluidos	4
2.1.1	Fluidos Newtonianos.....	5
2.1.2	Fluidos Não-Newtonianos.....	5
2.1.2.1	Fluidos Dilatantes	7
2.1.2.2	Fluidos pseudoplásticos	7
2.1.2.3	Fluidos dependentes do tempo	8
2.1.2.4	Fluidos Independentes do tempo	10
2.2	Sedimentação Gravitacional.....	10
2.3	Técnica de Atenuação de Raios-gama	11
3	METODOLOGIA	13
3.1	Material	13
3.2	Reologia	13
3.2.1	Histerese.....	14
3.2.2	Curva de escoamento / reograma	15
3.3	Unidade de aplicação de radioisótopos.....	15
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	18
4.1	Histerese.....	18
4.2	Curva de Escoamento / Reograma	19
4.3	Ensaio de Sedimentação	23
5	CONCLUSÃO	26
6	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, que se configura como uma das principais *commodities* minerais produzidas pelo Brasil, é um recurso composto por inúmeros hidrocarbonetos que dão origem a variadas misturas (entre estas, estão a gasolina, parafina, gás natural, GLP, produtos asfálticos, nafta, querosene, solventes, óleos combustíveis, óleos lubrificantes, óleo diesel e combustível de aviação) de grande utilidade em diversas áreas nas fábricas e indústrias em geral (PETROLEO, 2021).

Atualmente no Brasil, grande parte das reservas de petróleo está sob a água do oceano atlântico como ilustrado na Figura 1.1, em reservatórios submarinos cujo acesso só é possível através de perfurações (SOUZA et al., 2017).

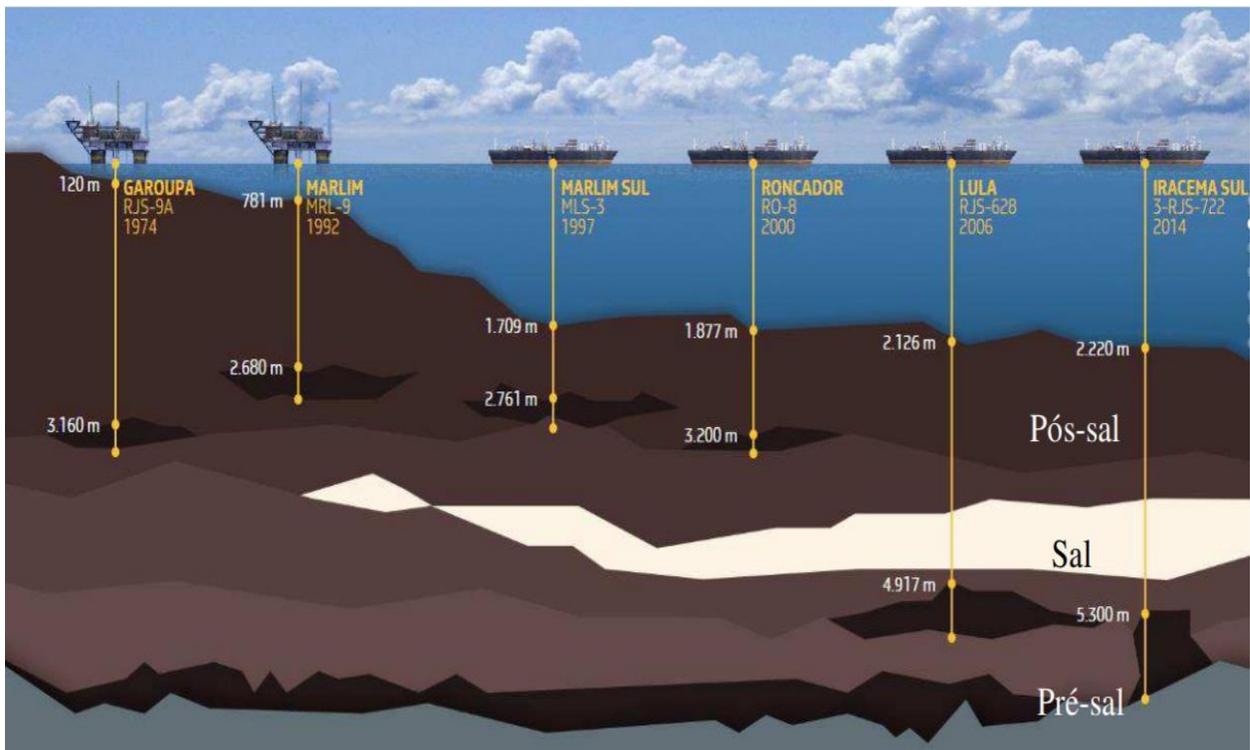


Figura 1.1 - Ilustração das profundidades das reservas de petróleo e gás natural exploradas pela Petrobras S.A. (Fonte: PETROBRAS, 2021).

Visto que o petróleo se destaca como importante fonte energética e a mistura de hidrocarbonetos é retirada de poços extremamente profundos, o estudo das operações de perfuração dos poços de

petróleo são indispensáveis, pois há uma enorme complexidade na perfuração e é desejável minimizar o tempo de perfuração e o dano ao reservatório produtor (PETROBRAS, 2021).

Numa perfuração do poço rápida e segura utiliza-se fluidos de perfuração, que devem apresentar as seguintes características (WALDMANN, 2005):

- ser estável quimicamente, não danificar as formações produtoras, suportar tratamento químico e físico;
- prevenir a corrosão da coluna de perfuração e demais equipamentos do sistema de circulação;
- ser bombeável;
- apresentar custo compatível com a operação;
- estabilizar as paredes do poço;
- manter os sólidos em suspensão quando estiver em repouso;
- facilitar a separação dos sólidos gerados pela broca (cascalhos) em superfície e facilitar as interpretações geológicas do material retirado do poço;
- facilitar paradas operacionais, quando necessárias.

Essas características são obtidas a partir da adição de agentes, tais como: adensantes, viscosificantes, dispersantes, defloculantes, obturantes, emulsionantes, lubrificantes, controladores de pH, entre outros (FAIM, 2020).

Caso o processo de perfuração não seja feito corretamente, Thomas (2001) elencou possíveis danos operacionais que podem vir a acontecer como influxo de fluidos indesejados e prisão da coluna de perfuração, decorrentes do acúmulo de sólidos no espaço anular da broca, acarretando a redução da vida útil e da taxa de penetração, além da obstrução anular fazendo com que o processo de perfuração pare.

Para garantir um estudo completo dos fluidos utilizados na perfuração, deve-se conhecer a reologia, que é o estudo da deformação que os fluidos sofrem ao serem tensionados por uma força ou pressão, e a sedimentação dos sólidos da suspensão.

Salvo o desempenho reológico, outro dado a ser avaliado é o perfil de sedimentação dos sólidos suspensos quando em repouso. Segundo Arouca (2007), características importantes que precisam ser observadas no fluido durante o estudo e projeto de um processo de sedimentação, são:

distribuição de tamanho, concentração de sólidos, viscosidade e massa específica do fluido como variáveis que influenciam a dinâmica de separação sólido-fluido.

Neste trabalho, análises de sedimentação foram realizadas por meio da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG), a qual apresenta resultados com boa confiabilidade (WILLIANS et al., 1990). O intuito dessa técnica é avaliar a variação da concentração volumétrica dos sólidos em diferentes alturas e tempos. Vale citar que a TARG apresenta comportamento não destrutivo e não invasivo, podendo utilizar uma mesma amostra várias vezes sem que ela seja comprometida. O princípio desta técnica pode ser explicado da seguinte forma: uma fonte de radiação gama emite um feixe de fótons através do fluido, e esta radiação é atenuada pela difração, reflexão e espalhamento da radiação no meio, sem interferir no processo de sedimentação (OLIVEIRA, 2014). A atenuação pode ser associada com a quantidade de matéria existente no meio experimentalmente, permitindo monitorar a variação de sólidos suspensos ao longo do tempo.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar o comportamento de fluidos de perfuração utilizados na indústria em situações de parada operacional.

Como objetivos específicos, cita-se:

- Executar estudos reológicos dos fluidos de perfuração disponibilizados pela Petrobras S.A.;
- Analisar comparativamente a sedimentação de fluidos com composições similares.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico serão apresentados o estado da arte para uma melhor compreensão dos fluidos de perfuração e suas propriedades, bem como do processo de sedimentação.

2.1 Reologia de Fluidos

A reologia é o ramo da física que estuda a deformação e fluxo da matéria, onde se pode estabelecer relações entre tensões de cisalhamento e taxas de deformação dos fluidos, a fim de caracterizá-los e classificá-los, como demonstrado na Figura 2.1. A aplicação de uma força tangencial a um corpo e a sua deformação subsequente constituem a base de observação numa análise reológica (BIRD, 2002). Nos tópicos posteriores, serão apresentados alguns tipos de fluidos newtonianos e não-newtonianos.

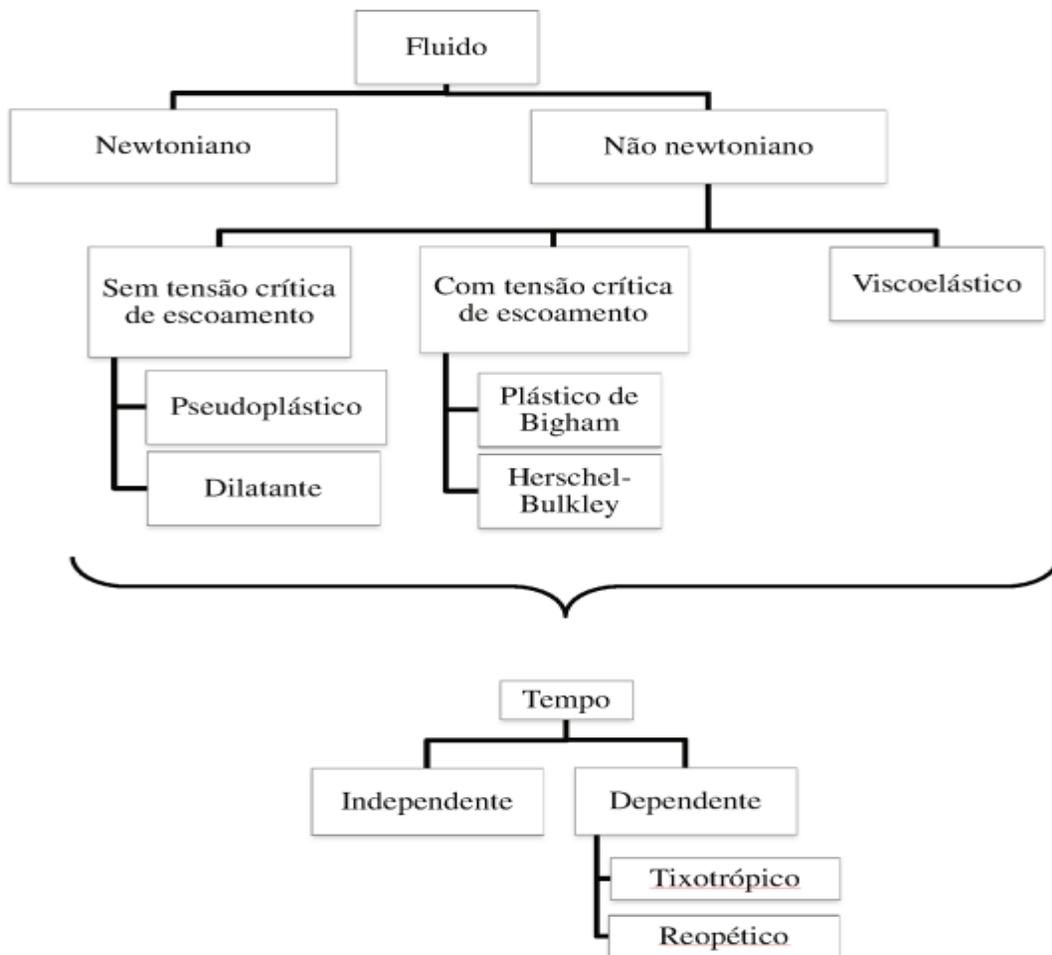


Figura 2.1 - Classificação reológica dos fluidos. (Fonte: FAGUNDES, 2019).

2.1.1 Fluidos Newtonianos

Os fluidos newtonianos apresentam uma resistência ao escoamento linearmente dependente da taxa de cisalhamento, quando a pressão e temperatura são mantidas constantes. De acordo com Bird (2002), a relação matemática entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$) para esse tipo de fluido é representada pela Equação 2.1 a seguir, também chamada de Lei de Newton da viscosidade.

$$\tau_{yx} = \mu \left(-\frac{dv_x}{dy} \right) \mu \dot{\gamma}_{yx} \quad (2.1)$$

Onde μ é a viscosidade do fluido.

A equação descrita apresenta um comportamento linear e tem início na origem dos eixos, como ilustrado na Figura 2.2:

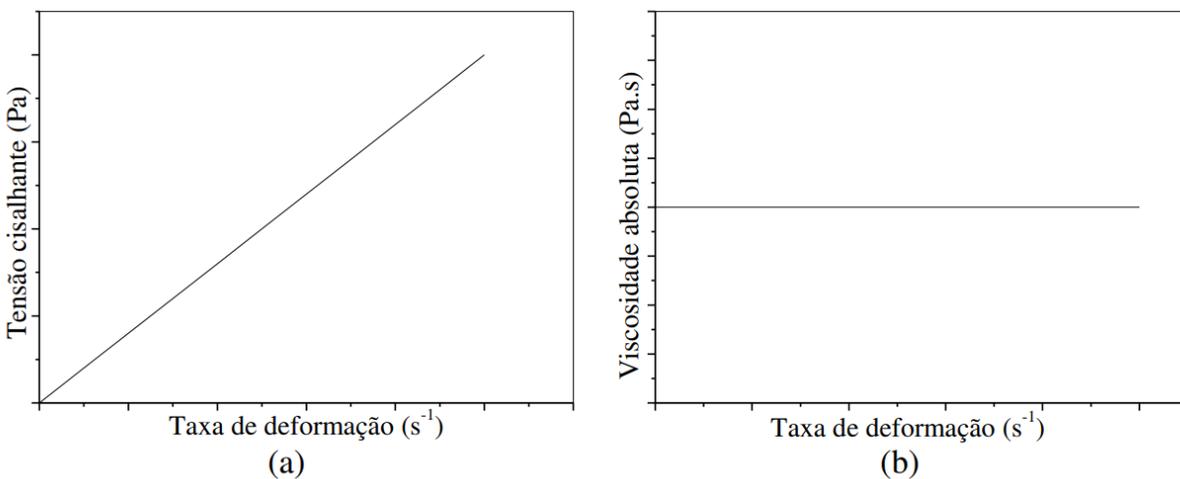


Figura 2.2 - Curvas a) de escoamento e b) de viscosidade características de um fluido newtoniano em temperatura e pressão constantes (Fonte: FAGUNDES, 2019).

2.1.2 Fluidos Não-Newtonianos

Ao contrário dos fluidos newtonianos, não-newtonianos podem se deformar não-linearmente com a taxa de cisalhamento e podem ser dependentes do tempo. Esses fatos caracterizam os fluidos não-newtonianos em diferentes grupos como apresentado na Figura 2.3 e são classificados de acordo com o tipo de deformação apresentada e a dependência do tempo (BIRD et al., 2002).

Para descrever o comportamento da tensão em função da taxa de deformação de diferentes complexidades, são apresentados alguns modelos matemáticos na literatura. Os mais comuns são:

- Modelo Power law, também conhecido por Ostwald de Waele (Equação 2.2): este modelo reológico é indicado para deformações intermediárias de uma curva reológica que parte da origem dos eixos.

$$\tau = m\gamma^n \quad (2.2)$$

sendo m o coeficiente de consistência e n o índice de comportamento. Ao analisar o índice de comportamento, têm-se: se $n < 1$, o comportamento do fluido é pseudoplástico. se $n > 1$, indicação de comportamento dilatante e, se $n = 1$, o fluido é newtoniano (CHHABRA e RICHARSON, 2008).

- Modelo de Bingham (Equação 2.3) é também um modelo bi-paramétrico, no entanto, deve ser utilizado, como o próprio nome sugere, para fluidos plásticos de Bingham.

$$\tau = \tau_0 + m\gamma \quad (2.3)$$

em que τ_0 indica a tensão crítica de escoamento (REED, 1995).

- Modelo de Herschel-Bulkley é também chamado de Bingham generalizado, pois além de apresentar o termo τ_0 , apresenta o expoente da taxa de deformação que leva em consideração a não-linearidade entre tensão e taxa cisalhante, como apresentado na Equação 2.4 (REED, 1995).

$$\tau = \tau_0 + m\gamma^n \quad (2.4)$$

Vale ressaltar que os modelos de fluidos não-newtonianos são ajustes de resultados experimentais, onde o comportamento reológico do fluido é representado com o máximo de fidelidade possível (FERNANDES, 2014).

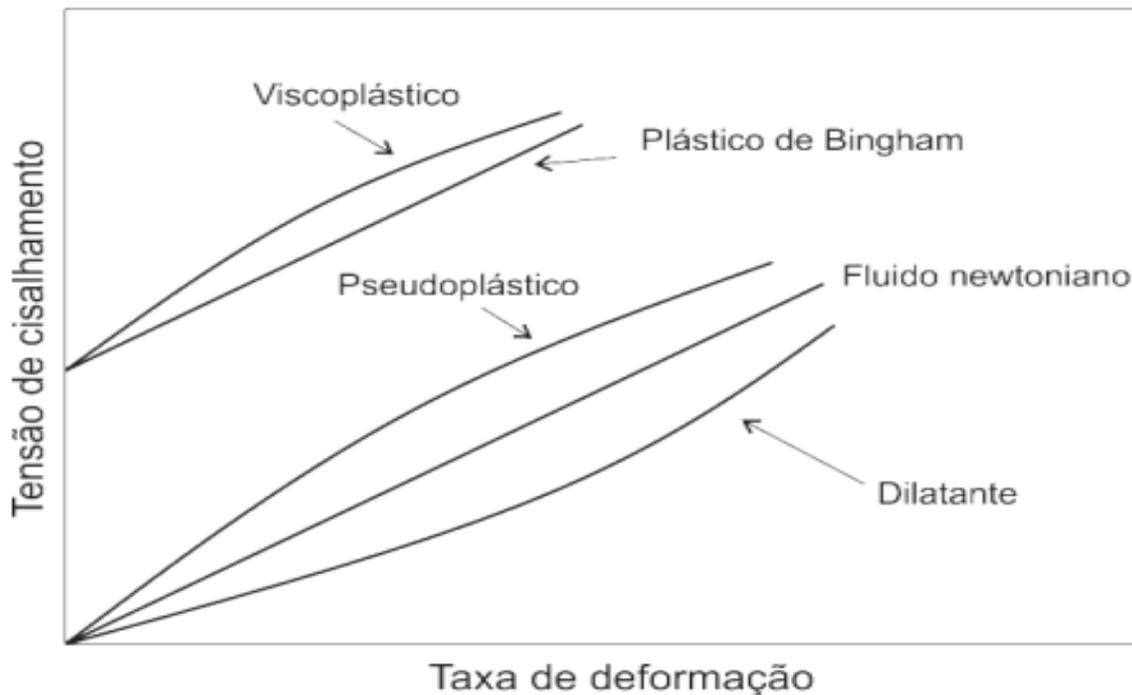


Figura 2.3 - Reograma geral para fluidos newtonianos e não-newtonianos (Fonte: BIRD, 2002)

2.1.2.1 Fluidos Dilatantes

São fluidos que não possuem tendência linear e passam pela origem do gráfico da tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação. A viscosidade aparente tende a aumentar com o crescimento da taxa de cisalhamento submetida ao fluido. Essa característica é oposta aos fluidos pseudoplásticos (CHHABRA E RICHARSON, 2008).

2.1.2.2 Fluidos pseudoplásticos

Fluidos pseudoplásticos exibem uma diminuição da viscosidade aparente conforme o cisalhamento sobre o fluido aumenta. São fluidos que, quando estão em repouso, as moléculas, que são emaranhadas de cadeia longa, se orientam e mantêm uma ordem regular, impactando no comportamento da viscosidade e deixando o fluido mais viscoso, com alta resistência ao escoamento, até uma força atuar sobre ele (WILKES, 2006).

É interessante notar que, em alguns fluidos pseudoplásticos que não possuem tensão inicial de escoamento, têm um patamar de viscosidade constante em deformações muito alta ou muito baixa. Em baixa taxa de deformação, a viscosidade se denomina viscosidade de cisalhamento zero (η_0),

e em alta taxa de deformação, denomina-se viscosidade de cisalhamento infinito (η_{∞}) (THOMAS, 2001).

De acordo com Chhabra e Richardson (2008), este comportamento não é fácil de ser notado, pois torna-se necessário equipamentos muito sensíveis para deformações e que suportem taxas de cisalhamento consideravelmente altas.

2.1.2.3 Fluidos dependentes do tempo

Os fluidos que dependem da taxa de cisalhamento, do histórico de tensões e do tempo de aplicação da mesma são classificados em dois grupos: tixotrópico e reopético (OLIVEIRA JÚNIOR, 2014), como pode ser observado na Figura 2.4.

Fluidos tixotrópicos apresentam diminuição da viscosidade aparente com o tempo de deformação. Esse comportamento reológico pode ser entendido com base em microestruturas, que são fruto de forças de atração relativamente fracas entre as moléculas do fluido, causando a formação de estruturas gelificadas que formam redes de partículas no corpo do fluido. A viscosidade aparente pode ser aumentada quando se cessa o cisalhamento, com a recomposição das estruturas particuladas do fluido (FAIM, 2020).

Fluidos reopéticos, ao contrário dos tixotrópicos, aumentam sua viscosidade aparente com o tempo de deformação. Com a taxa de cisalhamento constante, ocorre um aumento da viscosidade aparente, onde a curva de aceleração apresenta valores de tensão de cisalhamento inferiores aos valores da curva de desaceleração (FERREIRA, 2008).

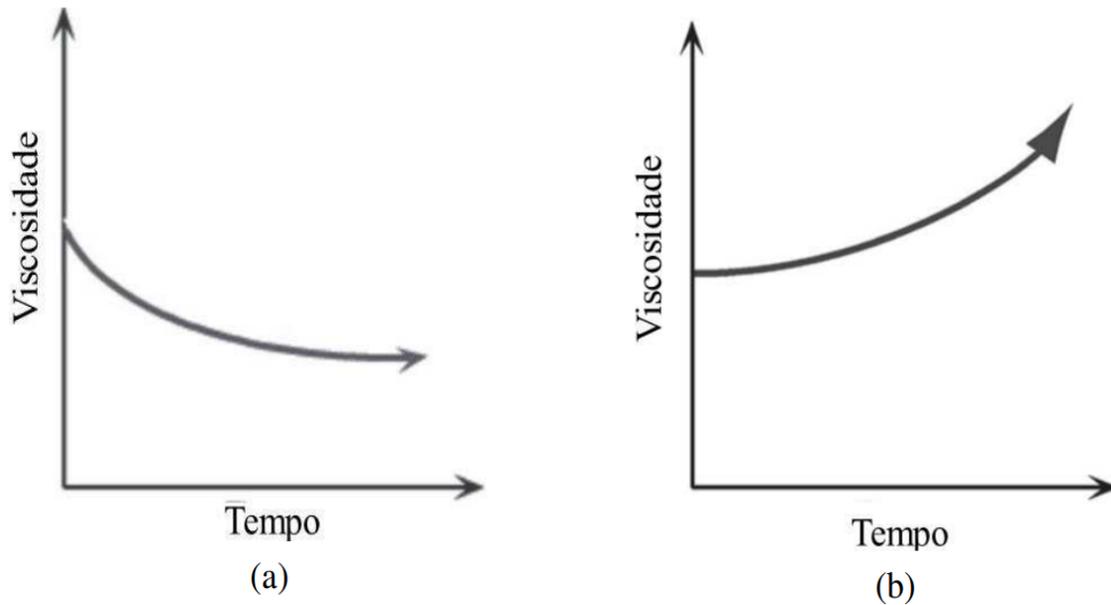


Figura 2.4 - Ilustração do comportamento a) tixotrópico e b) reopético de um fluido quando submetido à deformação constante (Fonte: FAGUNDES, 2019).

O comportamento reológico dependente do tempo pode ser avaliado pela histerese, uma técnica experimental em que, partindo do repouso, se aumenta constantemente a taxa de deformação até um valor máximo e, em seguida, ocorre a diminuição da taxa de deformação até um valor mínimo. Com essa técnica aplicada, a curva de tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação obtida por este experimento irá indicar um ciclo de histerese, como mostrado na Figura 2.5 (Adaptado de CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

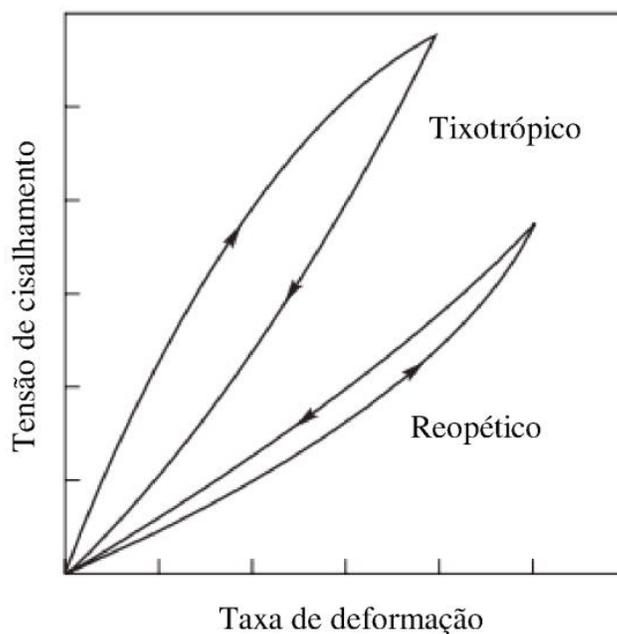


Figura 2.5 - Ilustração do comportamento tixotrópico e reopético de um fluido (Fonte: BIRD, 2002).

2.1.2.4 Fluidos Independentes do tempo

São fluidos em que as propriedades reológicas independem do tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, ou seja, a taxa de deformação é exclusivamente dependente da tensão aplicada. A Figura 2.3 ilustra duas classificações desses tipos de fluidos: sem tensão inicial – onde não necessitam de uma tensão de cisalhamento inicial para o escoamento; e com tensão inicial – uma tensão de cisalhamento inicial é necessária para o início do escoamento do fluido (BIRD, 2002).

2.2 Sedimentação Gravitacional

O fenômeno da sedimentação gravitacional é o processo que ocorre em uma suspensão devido a ação de uma força de campo (KYNCH, 1952).

Estudos relacionados à descrição de mecanismos existentes nos processos de separação sólido-líquido, que foram baseados em ensaios de sedimentação em provetas, iniciaram-se apenas em 1916 com Coe e Clevenger, que foram os primeiros a propor uma metodologia para auxiliar no projeto de um sedimentador industrial contínuo (COE e CLEVENGER, 1916).

Em 1952, Kynch aprimorou os experimentos e desenvolveu o primeiro trabalho a abordar a sedimentação teoricamente. O processo de sedimentação foi descrito a partir da equação da

continuidade para o constituinte sólido, sem conhecer os detalhes das forças sobre as partículas. A hipótese do modelo de Kynch se baseia na formação de sedimentos incompressíveis e a sua utilização para projetos de sedimentadores, que devem operar com sedimentos de pequenos graus de compressibilidade. Algumas suposições foram levadas em consideração, como (KYNCH, 1952):

- Efeito de parede não é considerado;
- A concentração de sólidos aumenta conforme se chega próximo ao fundo do recipiente;
- A sedimentação é unidimensional;
- A velocidade de sedimentação depende apenas da concentração local de sólidos.

Embora seu trabalho se trate apenas de sedimentação em batelada, pode-se utilizar os conceitos em sedimentos contínuos, pois a forma de calcular a concentração da interface superior em função do tempo de ensaio é válida para processos contínuos.

2.3 Técnica de Atenuação de Raios-gama

A Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) consiste no monitoramento da concentração de sólidos ao longo de uma coluna pré-estabelecida (AROUCA, 2003). Esta técnica funciona da seguinte forma: um feixe de raios gama de alta energia incide em uma coluna, e a quantidade de energia que foi atenuada é medida por um detector. 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. É possível calcular a concentração de sólidos da suspensão através da Equação 2.5 a seguir, onde compara-se 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 (GARDNER, 1967):

$$l \ln\left(\frac{R_0}{R(t)}\right) = \beta \varepsilon_s(t) \quad (2.5)$$

Onde ε_s é a concentração de sólidos; R_0 a intensidade do feixe medida quando não há sólidos ($\varepsilon_s = 0$); R é a intensidade do feixe em um determinado momento; e β é o 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.
- 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.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Material

Neste trabalho foram utilizados dois fluidos de perfuração reais fornecidos pela empresa Petrobras[®], o qual identificados como F1 e F2. Os fluidos consistem em soluções aquosas com quantidade iguais de aditivos como controladores de pH, agentes viscosificantes, lubrificantes e agentes obturantes. Entretanto, para o fluido F1 foi adicionado uma quantidade de CaCO_3 suficiente para uma concentração de 1,022% (v/v), enquanto para o fluido F2, a concentração de CaCO_3 foi de 1,26% (v/v).

3.2 Reologia

As análises reológicas das soluções foram realizadas utilizando um viscosímetro Brookfield, modelo DV2TLV (Figura 3.1), com acoplamento para amostras pequenas e geometria do tipo cone rotativo e placa fixa. Os dados foram obtidos utilizando o software RheocalcT. Os ensaios reológicos foram realizados em triplicata.



Figura 3.1 - Viscosímetro Brookfield DV2T.

O viscosímetro tem como princípio de funcionamento a medição da viscosidade do fluido em velocidades fixas de rotação com a utilização de uma mola previamente calibrada pela empresa Brookfield e um spindle acoplado, o qual deve permanecer imerso na amostra a ser realizada. A Figura 3.2 ilustra como a resistência viscosa da amostra contra o spindle faz com que a mola desvie. Essa deflexão está relacionada com o torque.

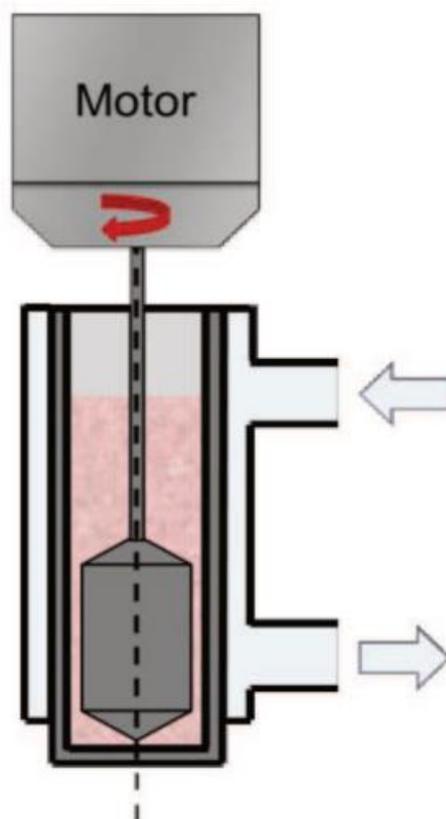


Figura 3.2 - Princípio de funcionamento do viscosímetro (Fonte: FAGUNDES, 2019)

3.2.1 Histerese

Para avaliar o comportamento reológico dependente do tempo dos fluidos, a Figura 2.5 ilustra o aumento, seguido da diminuição da taxa de deformação, ambos de forma gradual. Caso o fluido apresente dependência com o tempo, as curvas de tensão cisalhante em função da taxa de deformação aplicada não coincidem, formando entre elas uma área, denominada de área de histerese.

Os fluidos foram submetidos ao aumento seguido da diminuição da taxa de deformação. Também houve um pré-cisalhamento de 5 minutos e repouso de 2 minutos antes de cada experimento. nos fluidos F1 e F2 foi utilizado o spindle SC4-18. Após a etapa inicial, foram aplicadas as taxas de 0,1, 0,5, 1,0, 5,0 e 10,0 s^{-1} para o fluido F1 e 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0 e 7,0 s^{-1} para o fluido F2. As taxas a que cada suspensão foi submetida foram definidas em conformidade com a sensibilidade do torque do viscosímetro e o tempo de aplicação de cada uma delas foi de 1 minuto.

3.2.2 Curva de escoamento / reograma

A determinação da curva de escoamento foi necessária para avaliação do espessamento e da pseudoplasticidade das suspensões em análise. Para tanto, foi utilizado o spindle SC4-18 e foi realizado o seguinte procedimento experimental: aplicação de um pré-cisalhamento durante 5 minutos e repouso de 2 minutos. Após isso, aplicou-se uma taxa constante por 1 hora. Este procedimento foi realizado para as taxas previamente escolhidas de 0,1, 0,5, 1,0, 5,0 e 10,0 s^{-1} para o fluido F1 e 2,0, 3,0, 4,0, 5,0, 6,0 e 7,0 s^{-1} para o fluido F2.

3.3 Unidade de aplicação de radioisótopos

O monitoramento da sedimentação utilizou a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG). A diferença de energia de um feixe de raios gama, antes e após atravessar a suspensão em estudo é a base do funcionamento desse equipamento.

A unidade é formada por uma estrutura metálica com uma fonte radioativa no interior do equipamento e um sistema de detecção de radioatividade, como representado na Figura 3.3. O sistema de detecção é acoplado a uma peça de chumbo, e a fonte de radiação, Amerício-241, é envolta por um cubo de chumbo onde se pode direcionar o feixe de radioisótopos.

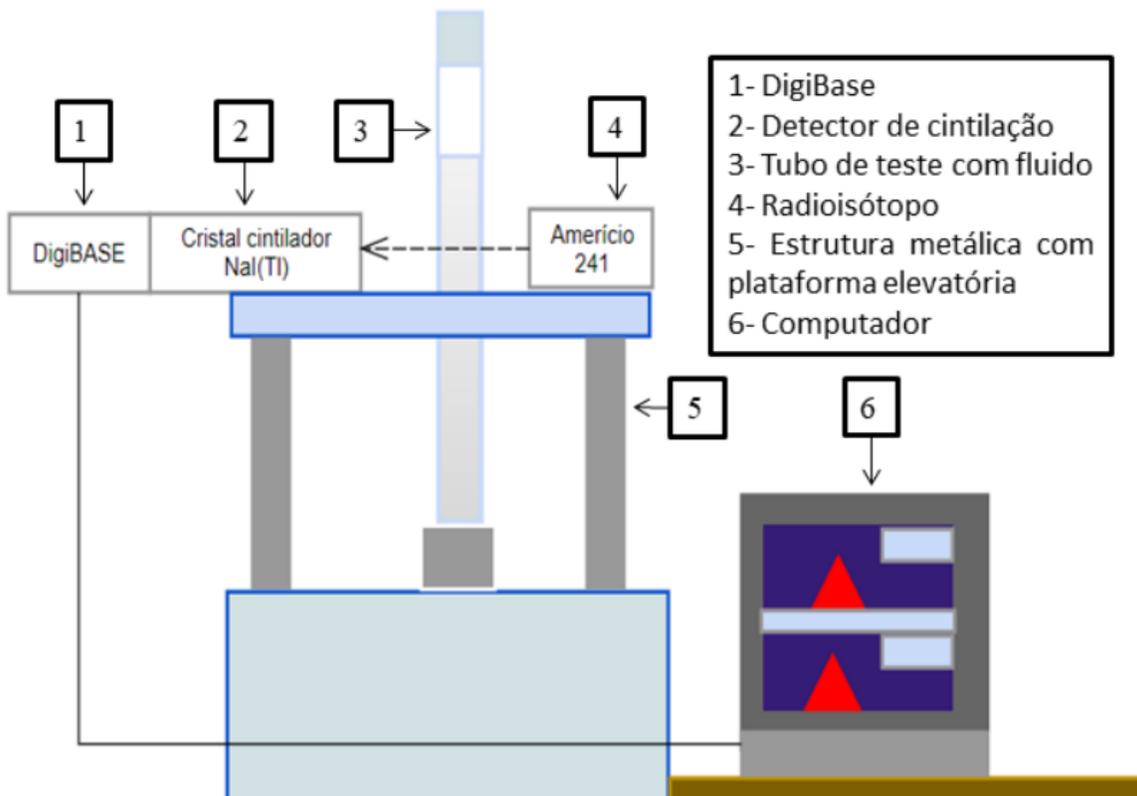


Figura 3.3 - Ilustração da unidade de aplicação de radioisótopos. (Fonte: FAGUNDES, 2019).

Esse sistema é composto por três partes:

- Um cristal cintilador de iodeto de sódio (NaI) ativado por Tálcio, cuja função é transformar a radiação absorvida em fótons de luz. Ao receber a energia do radioisótopo, os elétrons do iodeto de sódio vão para uma camada de valência mais energética e, quando retornam ao estado natural, emitem fótons de luz (GARDNER e ELY-JR, 1967);
- Um detector modelo Digibase da marca ORTEC, equipamento que combina um pré-amplificador e detector de altas voltagens com um analisador digital de canais;
- Um computador com o software Maestro, que é utilizado para determinar a intensidade de radiação detectada pelo cristal cintilador por meio do cálculo da área do pico energético do radioisótopo.

Para os experimentos, 500 mL de fluido foram adicionados em tubos cilíndricos de vidro e estes foram posicionados entre a fonte e detector na base do equipamento.

Dessa forma, a técnica foi aplicada em diferentes pontos ao longo do eixo vertical (eixo z), sendo eles $z = (0,5; 2; 4; 8; 12; 16; 18; 20; 22; 23; 24)$ cm, medidos a partir da base da coluna com medidas feitas diariamente durante 55 dias.

As medidas foram feitas em uma determinada posição em z, onde o detector coletou intensidade de feixes de raios gama por 20 segundos, e após esse tempo, o valor foi registrado no software Maestro®. Repetiu-se esse procedimento 10 vezes para cada posição. Por fim, o valor médio de intensidade foi calculado em cada posição para cada dia.

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.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados e as discussões deste trabalho. Com a intenção de tornar a leitura mais dinâmica, optou-se por apresentar primeiro todos os resultados e discussões referentes à reologia e, em seguida, os relacionados aos ensaios de sedimentação.

4.1 Histerese

As curvas de escoamento para o aumento e a diminuição gradual da deformação em cada fluido estão apresentadas nas Figuras 4.1 e 4.2.

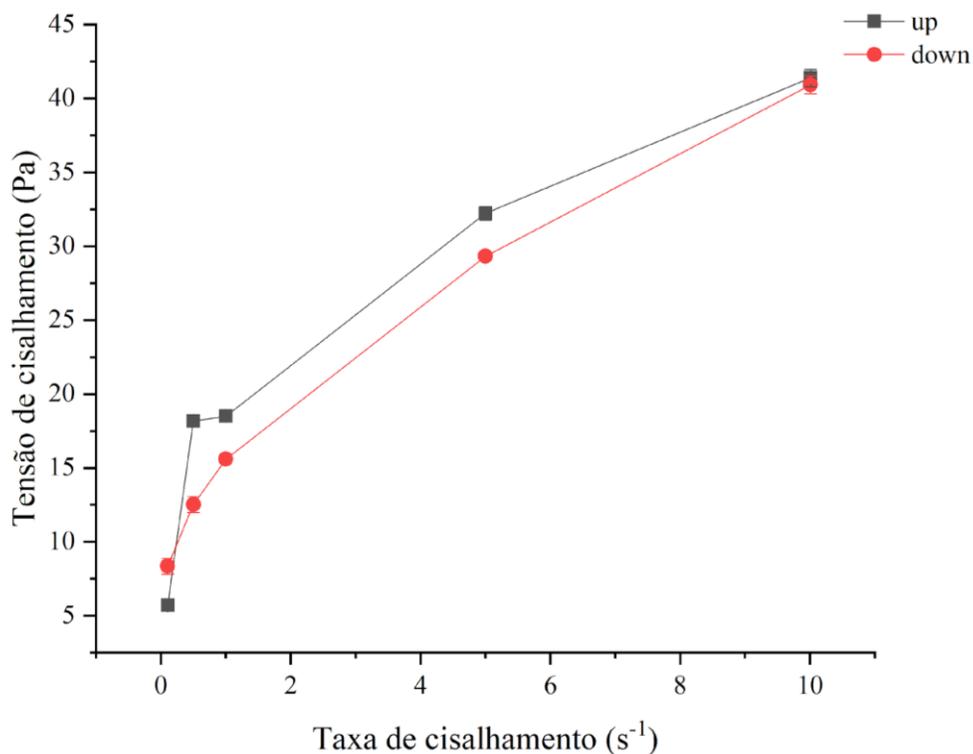


Figura 4.1 - Curvas das respostas reológicas referente ao fluido F1.

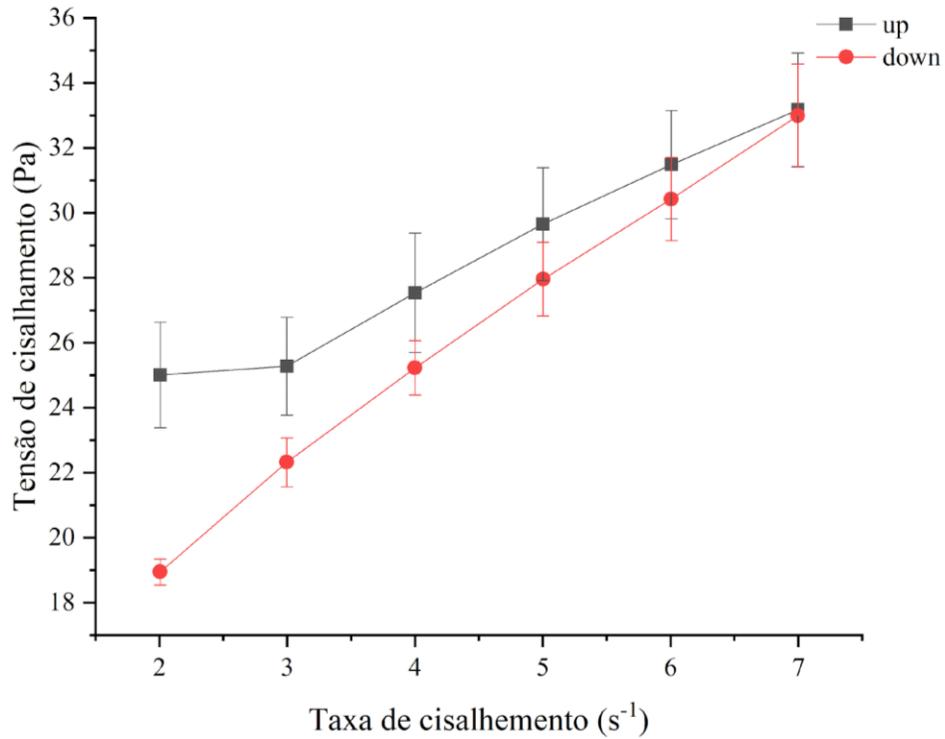


Figura 4.2 - Curvas das respostas reológicas referente ao fluido F2.

As respostas obtidas nesse experimento foram utilizadas para verificação da existência de uma área entre as curvas de aumento e de diminuição da deformação de cada solução, indicando que ambos os fluidos são tixotrópicos.

Na figura 4.1, para a taxa de cisalhamento de $0,5 \text{ s}^{-1}$ pode se observar que há uma diferença na tensão de cisalhamento em relação a curva da ida com a curva da volta. Essa diferença não pode ser observada para o fluido F2 devido a limitação do equipamento utilizado.

4.2 Curva de Escoamento / Reograma

As curvas de escoamento para os fluidos F1 e F2 estão apresentadas nas Figuras 4.3 e 4.4. A Figura 4.5 apresenta o reograma dos dois fluidos. Para cada fluido, foram ajustados os modelos de Newton, Bingham, *Power-law* e Herschel-Bulkley.

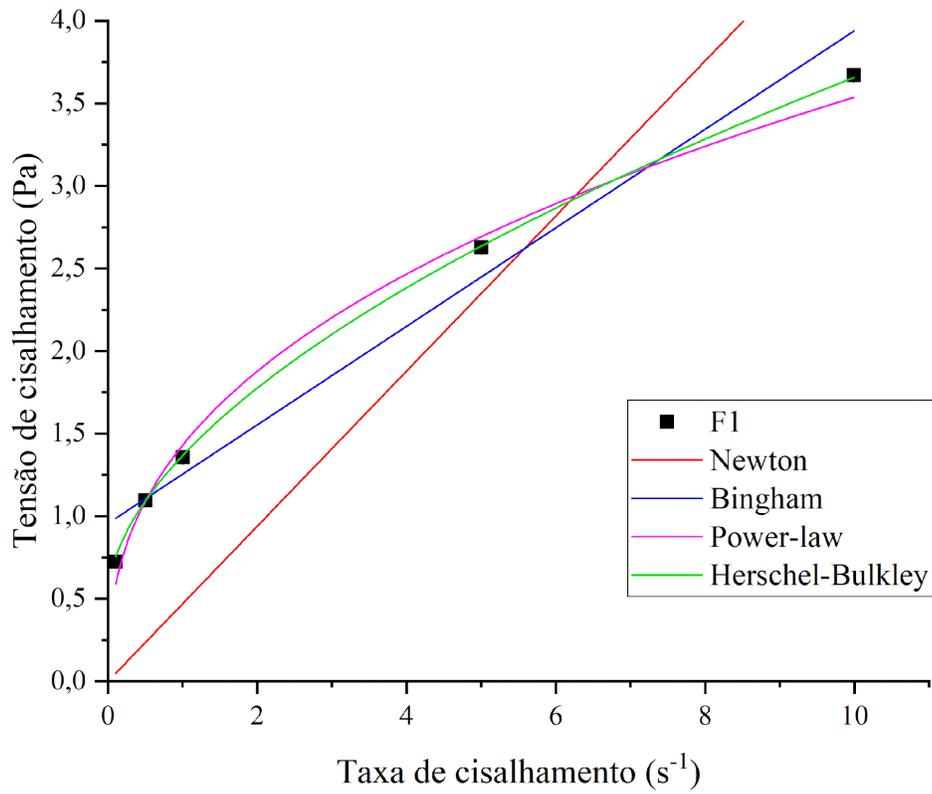


Figura 4.3 - Curva de Escoamento do Fluido F1.

Ao se analisar a Figura 4.3 pode-se afirmar que, visualmente, o fluido F1 deve apresentar uma tensão de cisalhamento inicial (τ_0).

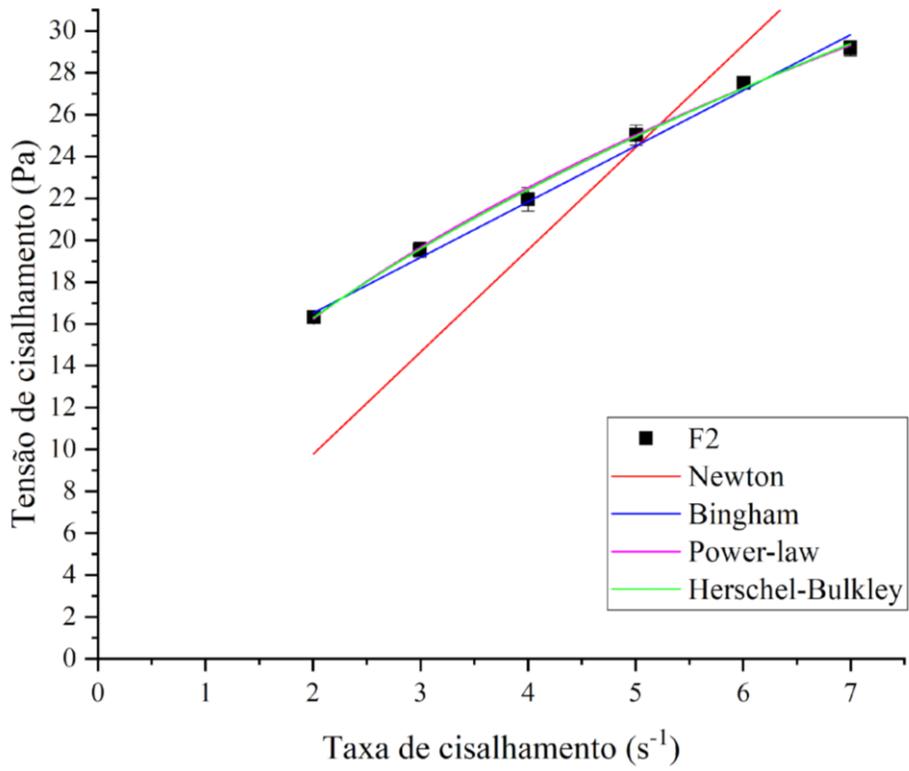


Figura 4.4 - Curva de Escoamento do Fluido F2.

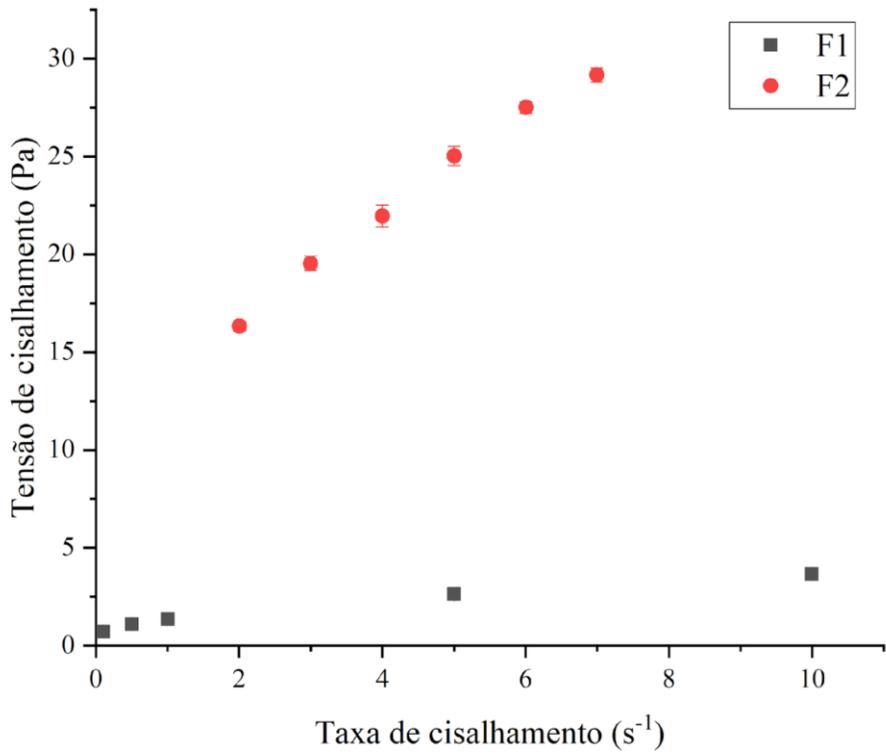


Figura 4.5 - Curva de escoamento dos fluidos F1 e F2.

Os resultados experimentais dos dois fluidos, visualmente combinados na Figura 4.5, nos mostram que o fluido F1 apresenta menos resistência ao escoamento quando comparado ao fluido F2, que apresenta uma grande resistência, visto que a curva de escoamento deste possui uma inclinação menor quando comparada ao fluido F2, ou seja, uma força menor é necessária para fazer com que o F1 sofra a mesma deformação que o fluido F2.

As Tabelas 4.1 e 4.2 apresentam os valores para o coeficiente de determinação, R^2 , e o valor dos parâmetros para cada modelo analisado.

Tabela 4.1: Parâmetros do fluido F1 estimados para os diferentes modelos reológicos.

Modelo	Equação	τ_0	m	n	R2
Newton	$\tau = m\gamma$	-	$0,4697 \pm 0,1257$	-	-0,0243
Power-law	$\tau = m\gamma^n$	-	$1,4292 \pm 0,0352$	$0,3935 \pm 0,0153$	0,9935
Bingham	$\tau = \tau_0 + m\gamma$	$0,9563 \pm 0,0815$	$0,2983 \pm 0,0257$	-	0,9708
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\gamma^n$	$0,5200 \pm 0,0479$	$0,8466 \pm 0,0556$	$0,568 \pm 0,0243$	0,9996

Tabela 4.2: Parâmetros do fluido F2 estimados para os diferentes modelos reológicos.

Modelo	Equação	τ_0	m	n	R2
Newton	$\tau = m\gamma$	-	$4,8861 \pm 0,4778$	-	0,1392
Power-law	$\tau = m\gamma^n$	-	$11,7071 \pm 0,1671$	$0,4718 \pm 0,0090$	0,9983
Bingham	$\tau = \tau_0 + m\gamma$	$11,1936 \pm 0,4346$	$2,6606 \pm 0,0958$	-	0,9935
Herschel-Bulkley	$\tau = \tau_0 + m\gamma^n$	$3,1055 \pm 4,7447$	$8,9892 \pm 4,072$	$0,5514 \pm 0,1429$	0,9980

De acordo com os resultados obtidos, pode-se considerar que ambos os fluidos se ajustam ao modelo de Herschel-Bulkley.

Quando se compara ambos os fluidos de acordo com o modelo de Herschel-Bulkley, o fluido F1 apresenta uma resistência ao escoamento (τ_0) maior que o fluido F2. Também pode se observar que o fluido F1 apresenta um índice de consistência (m) menor que o fluido F2.

4.3 Ensaio de Sedimentação

A sedimentação de carbonato de cálcio nos fluidos aquosos foi monitorada pela técnica de atenuação de raios gama em 11 posições diferentes $z = (0,5; 2; 4; 8; 12; 16; 18; 20; 22; 23; 24)$ cm, medidos a partir da base da coluna com medidas feitas diariamente durante 55 dias. As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram os resultados obtidos.

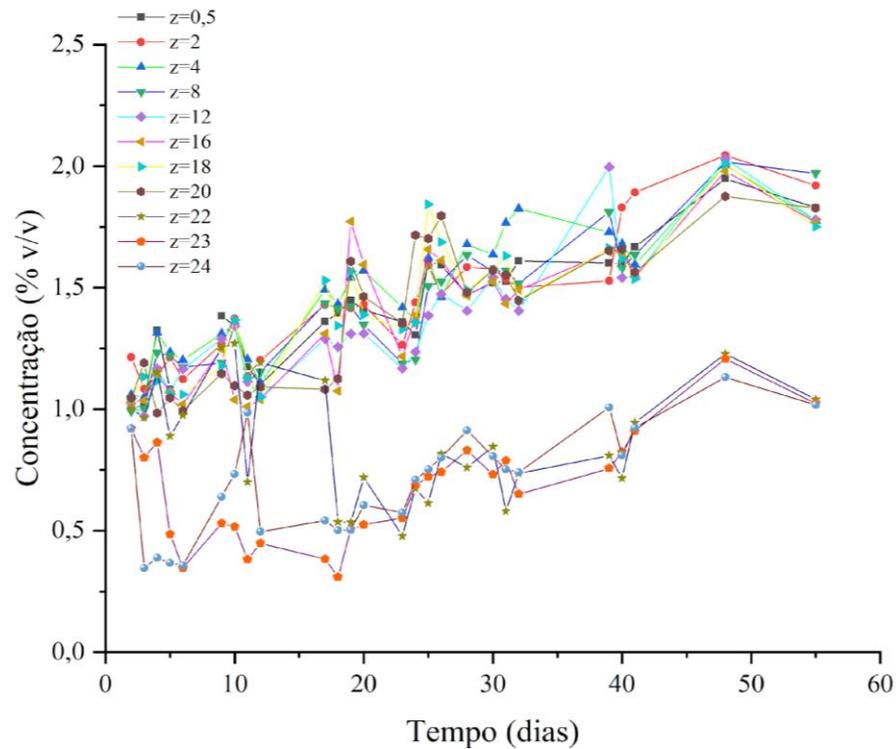


Figura 4.6 - Curva de sedimentação para o fluido F1.

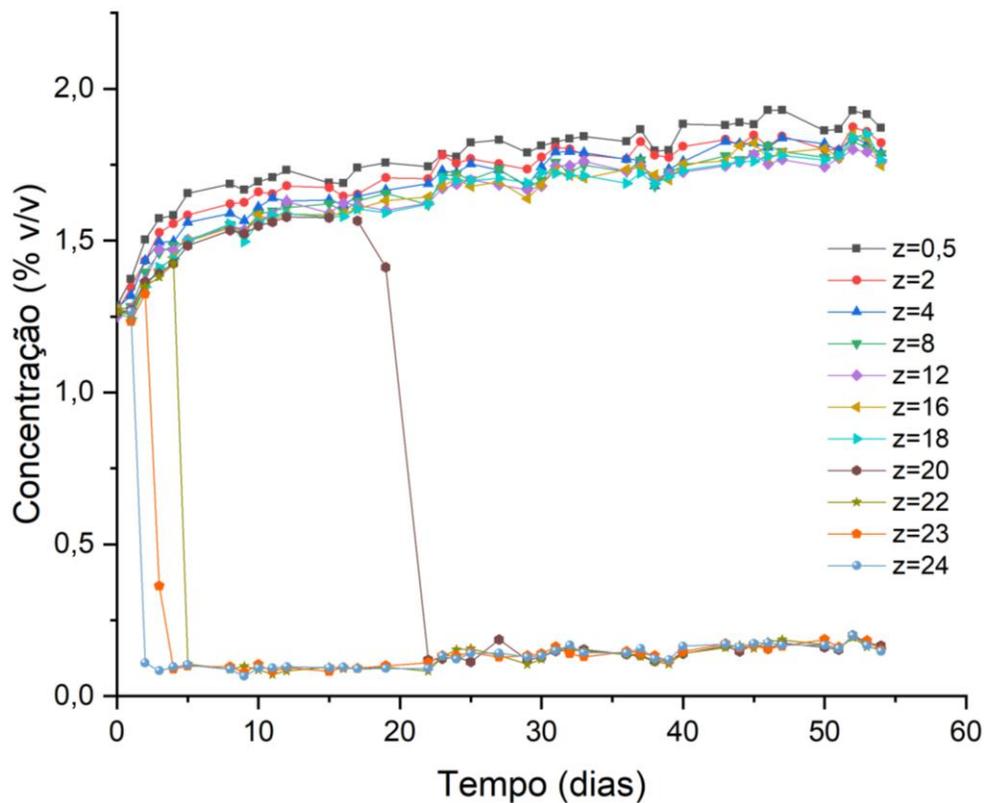


Figura 4.7 - Curva de sedimentação para o fluido F2.

Nestas figuras, observam-se dois grupos de curvas, sendo que cada uma apresenta um comportamento diferente:

- Para o primeiro grupo de curvas, partindo do primeiro dia de experimento, foi verificado uma tendência de subida, indicando um aumento de concentração. De acordo com o comportamento de sedimentação dado por Kynch (1952), esse comportamento era esperado para as posições mais próximas da base do cilindro, onde ocorreu um acúmulo de partículas;
- Para o segundo grupo de curvas, partindo do primeiro dia de experimento, foi verificado uma tendência de aumento de concentração e, eventualmente, um decaimento na concentração e estabilização. Esse tipo de comportamento é esperado em regiões mais altas no eixo z , onde será formada uma região que é denominada pela literatura de zona de líquido clarificado.

Para o fluido F1, pode-se perceber que a interface foi estabilizada por volta do dia 18 do experimento e na altura aproximada $z = 22$ cm, enquanto no fluido F2 a interface se apresentou

estável no dia 22 do experimento e na altura aproximada $z = 20$ cm. Diante desses dados, foi possível calcular a velocidade média de sedimentação de ambos os fluidos, e foi averiguado que a velocidade média do fluido F1 (0,11cm/dia) foi menor em relação ao fluido F2 (0,18cm/dia), ou seja, o fluido F2 sedimentou mais rápido.

5 CONCLUSÃO

Baseado neste estudo, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

1. Os fluidos F1 e F2 puderam ser caracterizados como fluidos de Herschel-Bulkley;
2. De acordo com a reologia dos fluidos, o fluido F1 demonstrou ter menor resistência à deformação que o fluido F2;
3. A altura do leito dos sólidos alcançou um estado final de 20 cm para o fluido F1 e 22 cm para o fluido F2, medidos a partir da base do cilindro de ensaio;
4. Foi possível verificar que a velocidade de sedimentação do fluido F1 foi menor em relação ao fluido F2;
5. Considerando que os fluidos possuem formulação parecida, diferenciada apenas pelo teor de CaCO_3 , pode-se dizer que a quantidade deste sólido em suspensão no fluido teve impacto, tanto na reologia quanto na sedimentação gravitacional;
6. 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.

6 REFERÊNCIAS

AROUCA, F. O. Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Química, UFU, Uberlândia, 2007.

BIRD, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N. Transport Phenomena, 2^a ed. Wiley, New York, 2002.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. Non-newtonian flow and applied rheology, Second Edition, 2008.

COE, H.S., CLEVINGER, G.H. Methods of determining the capacities of slime-settling tanks. Transactions of the American Institute of Mining Engineers, vol. 55, p. 356-384, 1916.

FAGUNDES, Flávia Marques. Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da técnica de atenuação de raios gama. 2019. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.28>

FAIM, João Guilherme Prates. Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração aquosos e olefinicos utilizando a atenuação de raios gama. 2020. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.196>

FERNANDES, Rubens Rosario. Metodologia para preparação de amostras em testes reológicos e determinação da tensão limite de escoamento de fluidos de perfuração. 169 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

FERREIRA, Gilvanete Maria. Estudo das propriedades reológicas do sistema polpa de cupuaçu-biopolímeros. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Processos Químicos e Bioquímicos, Departamento de Escola De Química, Universidade Federal Do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro. 120 f. 2008.

GARDNER, R.P., Ely- Jr, R.L., Radioisotope Measurement Applications in Engineering, Reinhold, New York, 1967.

KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. Trans. Amer. Soc., p. 166–176, 1952.

OLIVEIRA JÚNIOR, Hélio de. Cálculo da tensão nos sólidos para o espessamento e filtração de carbonato de cálcio em suspensões de fluidos newtonianos e pseudoplásticos. 115 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2014.353>

PETROBRAS. Exploração e produção de petróleo e gás. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/>>, acessado em: 25 de agosto de 2021.

PETROLEO. Fontes de Energia, Petróleo, Ciências Políticas. Disponível em: <<http://www.suapesquisa.com/geografia/petroleo/>>, acessado em: 25 de agosto de 2021.

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.

REED, J. S. Principles of Ceramics Processing, 2^a ed, John Wiley & Sons, 1995.

SOUZA, Gabriel Sahade de; Luporini, Samuel; Rigoli, Isabel Cristina (2017). Caracterização reológica de suspensões argilosas salinas com goma xantana para fluidos de perfuração de poços de petróleo. Matéria (Rio de Janeiro), 22(1). DOI: 10.1590/s1517-707620170001.0128

THOMAS, J. E. Fundamentos da Engenharia de Petróleo. 2. ed., Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2001

WALDMANN, A. T. A., “Mecanismos que governam a efetividade de agentes obturantes no controle da invasão de fluidos de perfuração na rocha reservatório de petróleo”. 2005.

WILKES, J. O. Fluid Mechanics for Chemical Engineers with Microfluidic sand CFD. 2. ed., United States of America, Ed. Pretice Hall Professional Technical Reference, 2006.

WILLIAMS, R.A., Xie, C.G., Bragg R., Amarasinghe, W.P.K. Experimental Techniques for Monitoring Sedimentation in Optically Opaque Suspensions. Colloids and Surfaces, vol. 43, p. 1-32, 1990. Doi: 10.1016/0166-6622(90)80001-K