

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ÉMERSON OLIVEIRA FERREIRA

UM ESTUDO PRELIMINAR SOBRE O ENVELHECIMENTO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Uberlândia - MG

2026

ÉMERSON OLIVEIRA FERREIRA

UM ESTUDO PRELIMINAR SOBRE O ENVELHECIMENTO DE FLUIDOS DE
PERFURAÇÃO DE POÇOS DE PETRÓLEO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial necessário para obtenção do título de mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Fábio de Oliveira Arouca
Coorientadora: Profa. Flávia Marques Fagundes

Uberlândia - MG

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

F383e
2026

Ferreira, Êmerson Oliveira, 1997-
Um estudo preliminar sobre o envelhecimento de fluidos de perfuração de poços de petróleo [recurso eletrônico] / Êmerson Oliveira Ferreira. -- 2026.

Orientador: Fábio de Oliveira Arouca.
Coorientadora: Flávia Marques Fagundes.
Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2026.11044>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia química. I. Arouca, Fábio de Oliveira, 1977-, (Orient.). II. Fagundes, Flávia Marques, 1989-, (Coorient.). III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

André Carlos Francisco
Bibliotecário(a)-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Química

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1K, Sala 206 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG,
CEP 38400-902

Telefone: (34)3239-4249 - www.ppgeq.feq.ufu.br - secppgeq@feq.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Defesa de Mestrado, 5/2026, PPGEQ				
Data:	29 de maio de 2026	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	17:15
Matrícula do Discente:	12422EQU001				
Nome do Discente:	Émerson Oliveira Ferreira				
Título do Trabalho:	Um Estudo Preliminar sobre o Envelhecimento de Fluidos de Perfuração de Poços de Petróleo				
Área de concentração:	Desenvolvimento de Processos Químicos				
Linha de pesquisa:	Processos de Separação				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Otimização da separação sólido-líquido na perfuração de poços de petróleo e gás e modelagem e simulação numérica de escoamentos de fluidos em seções anulares				
ODS-ONU:	ODS 9 - Indústria, Inovação e Infraestrutura				

Reuniu-se por meio de webconferência, a Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, assim composta: Professores Doutores: Angelica da Silva Reis - DECAQ/CEFET-MG, Fran Sérgio Lobato - FEQUI/UFU, João Jorge Ribeiro Damasceno - FEQUI/UFU, Flávia Marques Fagundes, coorientadora, e Fábio de Oliveira Arouca - PPGEQ/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público e concedeu ao discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa de Mestrado faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente

ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Fabio de Oliveira Arouca, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2026, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávia Marques Fagundes, Professor(a) Substituto(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2026, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Jorge Ribeiro Damasceno, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2026, às 17:19, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fran Sergio Lobato, Professor(a) do Magistério Superior**, em 29/05/2026, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Angelica da Silva Reis, Usuário Externo**, em 29/05/2026, às 17:20, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7349856** e o código CRC **6B5D0230**.

Dedico este trabalho aos meus pais,
Eduardo e Marilene, aos meus irmãos,
Eduardo Ferreira e Tamires.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não foi um caminho solitário e, por isso, deixo aqui meus sinceros agradecimentos a todos que, de formas diferentes, contribuíram para que esta dissertação se tornasse realidade.

À minha família, que sempre foi a base de tudo. Toda essa realização é nossa, por vocês e para vocês. Primeiramente agradeço imensamente aos meus pais, Eduardo e Marilene, pelo apoio incondicional, pela paciência ao longo de toda a trajetória e por nunca medirem esforços para que eu pudesse seguir estudando e acreditando no meu potencial. Aos meus irmãos, Tamires e Eduardo, companheiros de vida, que estiveram sempre presentes, seja incentivando, cobrando ou simplesmente me lembrando de que existe vida fora da dissertação. A convivência com vocês me ensinou que o tesouro da paciência tem limite, mas o afeto, não.

Agradeço também à equipe LabSep, aos amigos de pós-graduação e aos alunos de iniciação científica pelos conhecimentos divididos e aos agradáveis momentos de convivência. Agradeço especialmente aos meus orientadores Prof. Dr. Fábio de Oliveira Arouca e Profa. Dra. Flávia Marques Fagundes pela orientação técnica, pelo conhecimento compartilhado e pela confiança ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho. A condução segura, as discussões e os direcionamentos foram fundamentais para minha formação acadêmica e profissional. Aos professores do grupo de pesquisa, em especial aos professores João Jorge Ribeiro Damasceno e Fran Sérgio Lobato, pelas contribuições científicas, pelas discussões enriquecedoras e pelo ambiente de aprendizado que ajudou a consolidar este trabalho dentro de uma linha de pesquisa sólida e consistente.

Aos meus amigos que caminharam comigo ao longo dessa jornada dividindo risadas, angústias, cafés, mensagens de apoio e, sobretudo, companhia nos momentos em que tudo parecia mais difícil. Sem vocês, esta dissertação teria bem menos humor e bem mais dificuldades. Um agradecimento especial aos “gadinhos”, que estiveram por perto nos bons e maus momentos, oferecendo apoio moral, distração estratégica e aquela dose necessária de humor que evita qualquer colapso acadêmico.

Ao CNPQ, à PETROBRAS, à FAPEMIG e à CAPES pelo auxílio financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para essa conquista, minha gratidão. Este trabalho carrega não apenas esforço científico, mas também a presença e o carinho de cada um que fez parte dessa caminhada.

RESUMO

Os fluidos de perfuração desempenham papel essencial na indústria do petróleo, sendo responsáveis pelo controle de pressão, estabilidade do poço e transporte de cascalhos. Durante operações, esses fluidos podem permanecer estagnados sob condições térmicas elevadas, o que pode alterar suas propriedades e comprometer seu desempenho. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o efeito do envelhecimento acelerado na sedimentação de sólidos e no comportamento reológico de fluidos de perfuração à base de água, bem como investigar a influência do envelhecimento térmico no comportamento da goma xantana de forma isolada. Para isso, foram utilizados fluidos fornecidos pela Petrobras, submetidos a envelhecimentos a 65 °C por 0, 16, 32 e 48 horas. A sedimentação foi monitorada por meio da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG), enquanto os parâmetros físico-químicos foram submetidos à análise estatística ANOVA one-way ($\alpha = 0,05$). Paralelamente, soluções de goma xantana nas concentrações de 0,2% e 0,4% (m/m) foram envelhecidas em diferentes temperaturas para análise isolada do polímero. Os resultados mostraram que a densidade do fluido BRCARB10 apresentou variação estatisticamente significativa durante o envelhecimento ($p = 0,00833$), com redução entre 0h e 32h e posterior aumento entre 32h e 48h, embora os valores iniciais e finais não tenham diferido estatisticamente. Os parâmetros de concentração de sólidos, volume de filtrado e teor de sal mantiveram-se estáveis, evidenciando a robustez composicional do sistema. As análises reológicas indicaram aumento do índice de consistência e redução do índice de comportamento após 48 horas para o fluido de perfuração, sugerindo rearranjos estruturais que favorecem a suspensão de sólidos, confirmados pela ausência de sedimentação significativa por até 150 dias. Os ensaios de sedimentação revelaram elevada estabilidade gravitacional, sem formação de gradientes de concentração ao longo da coluna por longos períodos. O estudo da goma xantana evidenciou degradação térmica progressiva, especialmente em temperaturas mais elevadas, caracterizada pela redução do índice de consistência, aumento do índice de comportamento e diminuição da capacidade de reestruturação do sistema. Dessa forma, o trabalho pôde contribuir para observar que o envelhecimento térmico moderado afeta principalmente o comportamento reológico dos fluidos, sem comprometer sua estabilidade de sedimentação, destacando a importância das interações entre componentes na manutenção do desempenho operacional.

Palavras-chave: fluidos de perfuração; envelhecimento térmico; goma xantana; sedimentação; atenuação de raios gama; reologia.

ABSTRACT

Drilling fluids play an essential role in the petroleum industry, being responsible for pressure control, wellbore stability, and cuttings transport. During operations, these fluids may remain stagnant under elevated thermal conditions, which can alter their properties and compromise their performance. In this context, the present study aimed to evaluate the effect of accelerated aging on solids sedimentation and the rheological behavior of water-based drilling fluids, as well as to investigate the influence of thermal aging on the behavior of xanthan gum in isolation. For this purpose, fluids supplied by Petrobras (BRCARB10) were used and subjected to aging at 65 °C for 0, 16, 32, and 48 hours. Sedimentation was monitored using the Gamma-Ray Attenuation Technique (TARG), while physicochemical parameters were subjected to one-way ANOVA statistical analysis ($\alpha = 0.05$). Concurrently, xanthan gum solutions at concentrations of 0.2% and 0.4% (w/w) were aged at different temperatures for isolated polymer analysis. The results showed that the density of fluid BRCARB10 exhibited a statistically significant variation during aging ($p = 0.00833$), with a reduction between 0h and 32h and a subsequent increase between 32h and 48h, although initial and final values did not differ statistically. Solids concentration, filtrate volume, and salt content parameters remained stable, evidencing the compositional robustness of the system. Rheological analyses indicated an increase in the consistency index and a decrease in the flow behavior index after 48 hours for the drilling fluid, suggesting structural rearrangements that favor solids suspension, confirmed by the absence of significant sedimentation for up to 150 days. Sedimentation tests revealed high gravitational stability, with no concentration gradients forming along the column over long periods. The xanthan gum study evidenced progressive thermal degradation, especially at higher temperatures, characterized by a reduction in the consistency index, an increase in the flow behavior index, and a decrease in the system's restructuring capacity. Thus, this work contributed to observing that moderate thermal aging primarily affects the rheological behavior of the fluids without compromising their sedimentation stability, highlighting the importance of component interactions in maintaining operational performance.

Keywords: drilling fluids; thermal aging; xanthan gum; sedimentation; gamma-ray attenuation; rheology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da estrutura da dissertação.	21
Figura 2: Mixer rotativo.	54
Figura 3: Fluidos envelhecidos em diferentes tempos.	54
Figura 4: Representação do sistema de leitura da concentração volumétrica via TARG do fluido BRCARB10.	55
Figura 5: Fluido preparado para o envelhecimento.	56
Figura 6: Estufa laboratorial.	57
Figura 7: Unidade de aplicação da técnica de atenuação de raios gama (TARG).	63
Figura 8: Mixer manual	64
Figura 9: Solução de goma xantana envelhecida.	70
Figura 10: Fluxograma das taxas avaliadas para a histerese do sistema de GX.	75
Figura 11: Influência do envelhecimento na densidade do fluido de perfuração.	77
Figura 12: Influência do envelhecimento na concentração de sólidos do fluido de perfuração.	78
Figura 13: Influência do envelhecimento na filtração do fluido de perfuração.	79
Figura 14: Influência do envelhecimento no teor de sal do fluido de perfuração.	80
Figura 15: Curvas de escoamento para o fluido de perfuração nas 4 condições de envelhecimento acelerado.	82
Figura 16: Valores para o Índice de comportamento do Fluido BRCARB10.	83
Figura 17: Valores para o Índice de consistência do Fluido BRCARB10.	83
Figura 18: Tensão de cisalhamento máxima após repouso do fluido de perfuração em diferentes condições de envelhecimento.	85
Figura 19 - Perfis de concentração volumétrica de sólidos em função do tempo para o fluido de perfuração submetido a envelhecimento térmico acelerado por (a) 0, (b) 16, (c) 32 e (d) 48 horas.	89
Figura 20: Curva de tensão cisalhante da solução de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas após envelhecimento por 24h em 85 °C.	93
Figura 21: Curvas de viscosidade aparente das soluções de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento nas seguintes condições: (a) sem envelhecimento, (b) 50 °C por 24 horas, (c) 75 °C por 24 horas e (d) 85 °C por 24 horas.	94

Figura 22: Curvas de viscosidade aparente das soluções de goma xantana a 0,4% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento nas seguintes condições: (a) sem envelhecimento, (b) 50 °C por 24 horas, (c) 75 °C por 24 horas e (d) 85 °C por 24 horas.	95
Figura 23: Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para as soluções de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento: (a) índice de comportamento, (b) índice de consistência e (c) tensão inicial de escoamento.	96
Figura 24: Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para as soluções de goma xantana a 0,4% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento: (a) índice de comportamento, (b) índice de consistência e (c) tensão inicial de escoamento.	97
Figura 25: Curvas tixotrópicas para a goma xantana com 0,2%.	101
Figura 26: Curvas tixotrópicas para a goma xantana com 0,4%.	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores dos parâmetros de Hurschel-Bulkley.	81
Tabela 2: Constante de calibração para cada condição de envelhecimento.	87
Tabela 3: Valores do ajuste R^2 para o Fluido de GX a 0,2%.....	97
Tabela 4: Valores do ajuste R^2 para o Fluido de GX a 0,4%.....	98

LISTA DE SIGLAS

API: *American Petroleum Institute* (Instituto Americano de Petróleo).

CMC: Carboximetilcelulose.

GX: Goma xantana.

HPHT: Alta pressão e alta temperatura.

RPM: Rotações por minuto.

TARG: Técnica de atenuação de raios gama.

USDA: *United States Department of Agriculture*.

WBF: *Water-Based Fluids*.

LISTA DE SÍMBOLOS

A' : Fator pré-exponencial.

A : Área.

B : Constante da energia de ativação.

β : Coeficiente característico do sistema.

ε_s : Concentração volumétrica de sólidos.

ε_{s0} : Concentração de sólidos na alimentação.

ε_{sl} : Concentração de retirada da lama.

F : Força.

g : Aceleração da gravidade.

h : Altura.

$\%H_2O_{\text{corrigida}}$: Percentual de salmoura.

H_2O_{lida} : Percentual de água

I : Intensidade de radiação.

I_A : Intensidades de radiação não atenuada pelo material A.

I_B : Intensidade de radiação não atenuada pelo material B

I_{AB} : Intensidade associada à atenuação conjunta dos blocos.

I_0 : Intensidade do feixe antes da passagem pelo meio físico.

I_G : Intensidade de fundo (*background*).

K : Índice de consistência.

μ : Viscosidade dinâmica.

μ_e : Viscosidade efetiva.

μ_p : Viscosidade plásticas.

n : Índice de comportamento do fluido.

η : Viscosidade.

P : Pressão hidrostática.

$ppm (NaCl)$: Concentração de cloreto de sódio na fase aquosa do fluido (salmoura).

ρ : Densidade do meio.

q_s : Velocidade superficial dos sólidos.

ρ : Densidade do fluido.

R : Intensidade local corrigida pelo tempo de resolução do sistema.

R_0 : Intensidade medida na região de líquido clarificado e corrigida pelo tempo de resolução do sistema.

R_i : Intensidade associada a um ponto, corrigida pelo tempo de resolução do sistema.

$\sigma(E)$: Coeficiente de atenuação mássico do meio para a energia considerada.

T : Temperatura.

τ : Tensão de cisalhamento.

τ_0 : Tensão crítica.

τ' : Tempo de resolução do sistema de detecção.

v : Velocidade do fluido.

v_{s0} : Velocidade de sedimentação das partículas na região de concentração constante.

y : Espessura atravessada pelo feixe de radiação.

γ : Intensidade de um feixe de raios gama.

$\dot{\gamma}$: Taxa de cisalhamento.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	19
INTRODUÇÃO	19
1.2 OBJETIVOS	20
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	21
CAPÍTULO 2	22
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO: VISÃO GERAL	22
2.1.1. CONCEITOS E FUNÇÕES	22
2.1.2. CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	24
2.1.3. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	25
2.1.4. ADITIVOS E SUAS FUNÇÕES	26
2.1.5. DENSIDADE DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	30
2.1.6. ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO	30
2.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO ..	31
2.2.1. FUNDAMENTOS DE REOLOGIA E REOMETRIA	31
2.2.2. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA	35
2.2.2.1. FLUIDOS NEWTONIANOS E NÃO-NEWTONIANOS	35
2.2.2.2. PSEUDOPLASTICIDADE	37
2.2.2.3. TIXOTROPIA	37
2.2.2.4. FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS	38
2.2.2.5. FLUIDOS VISCOELÁSTICOS	39
2.3. MODELOS MATEMÁTICOS	40
2.4. EFEITOS DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO E DA TEMPERATURA NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO	41
2.5. SEDIMENTAÇÃO EM SUSPENSÕES	45
2.6. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA	49
CAPÍTULO 3	52

MATERIAIS E MÉTODOS	52
3.1. FLUIDOS AQUOSOS DE PERFURAÇÃO DA PETROBRAS	52
3.1.1. PREPARO DAS AMOSTRAS	52
3.1.2. TESTE DE ENVELHECIMENTO ACELERADO NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO.....	55
3.1.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA.....	58
3.1.3.1. DENSIDADE.....	58
3.1.3.2. VOLUME DE FILTRADO (HP).....	58
3.1.3.3. CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS (RETORTA)	59
3.1.3.4. TEOR DE SAL (TITULAÇÃO).....	60
3.1.4. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	61
3.1.4.1. COMPORTAMENTO REOLÓGICO	61
3.1.5. ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA.....	62
3.1.6. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA.....	62
3.1.6.1. UNIDADE EXPERIMENTAL.....	62
3.1.6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE LEITURA	64
3.1.6.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS	65
3.1.6.4. TRATAMENTO DOS RESULTADOS DE INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	65
3.1.6.5. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA	66
3.1.6.6. CORREÇÃO DA INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	67
3.1.6.7. DETERMINAÇÃO DE R_0 E DO COEFICIENTE β	67
3.2. SOLUÇÕES AQUOSAS COM GOMA XANTANA.....	68
3.2.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES	68
3.2.2. TESTE DE ENVELHECIMENTO ACELERADO.....	70
3.2.3. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA	71
3.2.3.1. EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO	71

3.2.3.2. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PSEUDOPLÁSTICO	71
3.2.3.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TIXOTRÓPICO	73
3.2.3.4. AVALIAÇÃO DA HISTERESE	74
3.3. DECLARAÇÃO DE USO DE IA	74
CAPÍTULO 4.....	76
RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
4.1. AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DA VIDRARIA.....	76
4.2. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO DURANTE O ENVELHECIMENTO	76
4.3. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BRCARB10.....	77
4.3.1. CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS.....	77
4.3.1.1. DENSIDADE DO FLUIDO	77
4.3.1.2. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS.....	78
4.3.1.3. VOLUME DE FILTRADO	79
4.3.1.4. TEOR DE SAL	80
4.3.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO	80
4.3.3. AVALIAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO ENVELHECIDOS	86
4.3.3.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA	86
4.3.3.2. DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO.....	86
4.3.3.3. DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO ENVELHECIDOS	87
4.4. SOLUÇÕES AQUOSAS DE GOMA XANTANA.....	91
4.4.1. COMPORTAMENTO PSEUDOPLÁSTICO.....	91
4.4.2. ANÁLISE TIXOTRÓPICA PARA A GOMA XANTANA	100
CAPÍTULO 5.....	103
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	103
5.1. CONCLUSÕES	103
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104

REFERÊNCIAS107

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A matriz energética global é um pilar da sociedade moderna, sustentando o desenvolvimento econômico e tecnológico que conhecemos. Mesmo com o avanço das fontes renováveis, a demanda por combustíveis fósseis continua crescendo, e o petróleo se mantém como um insumo estratégico ainda indispensável. Essa relevância econômica e industrial exige que os métodos de exploração sejam cada vez mais eficientes, o que demanda conhecimento técnico de ponta e equipamentos cada vez mais sofisticados. Até chegar à refinaria, o petróleo percorre uma cadeia complexa de processos, desde a descoberta até o refino, envolvendo geologia, geoquímica, química e diversas engenharias (THOMAS, 2001).

Nesse contexto, a perfuração de poços é uma das etapas mais críticas da cadeia produtiva do petróleo, tanto técnica quanto economicamente. E entre os fatores que determinam o sucesso dessa etapa, os fluidos de perfuração merecem destaque. Eles influenciam diretamente o desempenho operacional e a viabilidade econômica do processo. Definidos como qualquer substância utilizada durante a perfuração, esses fluidos desempenham funções essenciais: controlam a pressão do poço, estabilizam as paredes, removem os fragmentos gerados pela broca, além de resfriá-la e lubrificá-la (WANG, 2021).

À medida que as atividades exploratórias avançam para ambientes cada vez mais desafiadores, com a perfuração de poços em profundidades crescentes, as exigências impostas aos fluidos de perfuração tornam-se mais severas.

Durante a perfuração de poços de petróleo, os fluidos podem permanecer estagnados em diferentes situações como paradas operacionais corretivas ou preventivas, bem como após o processo de cimentação das paredes (CAENN et al., 2017). Nessas circunstâncias, a estabilidade físico-química dos fluidos de perfuração passa a ser um fator decisivo para a segurança e a eficiência da operação, devido ao efeito do envelhecimento.

Monitorar a sedimentação dos sólidos em fluidos de perfuração, especialmente naqueles submetidos ao envelhecimento, é fundamental para entender como as partículas se comportam e como as propriedades do fluido se degradam ao longo do tempo. A exposição prolongada às condições de poço pode alterar significativamente a reologia e a estabilidade de fase do fluido, fator que afeta diretamente a separação sólido-líquido. Destaca-se a importância industrial do

problema: muitos fluidos de perfuração ficam retidos nos poços por longos períodos, seja em paradas operacionais ou após a cimentação. Entender como os componentes se comportam quando envelhecidos permite otimizar formulações, com ganhos de produção, econômicos e ambientais.

Nesse sentido, este estudo empregou a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) como ferramenta de monitoramento. É uma metodologia não destrutiva que permite acompanhar, em tempo real e por tempo indeterminado, a concentração volumétrica de sólidos ao longo da coluna de fluido. Com ela, é possível analisar o comportamento dos sólidos na sedimentação após condições controladas de envelhecimento acelerado observando como as partículas se depositam ao longo do tempo (Fagundes, 2019).

Além de contribuir para o avanço do conhecimento na área de separação sólido-líquido, este trabalho reforça a integração entre a pesquisa acadêmica e a aplicação industrial, ao fornecer subsídios para o aprimoramento dos sistemas de perfuração e consolidar a parceria entre a Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Petrobras.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto do envelhecimento acelerado nas propriedades físico-químicas e reológicas do fluido de perfuração e em seus componentes. Para isso, foram utilizadas análises reológicas e de sedimentação dos fluidos envelhecidos.

Para atender a esse objetivo geral, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

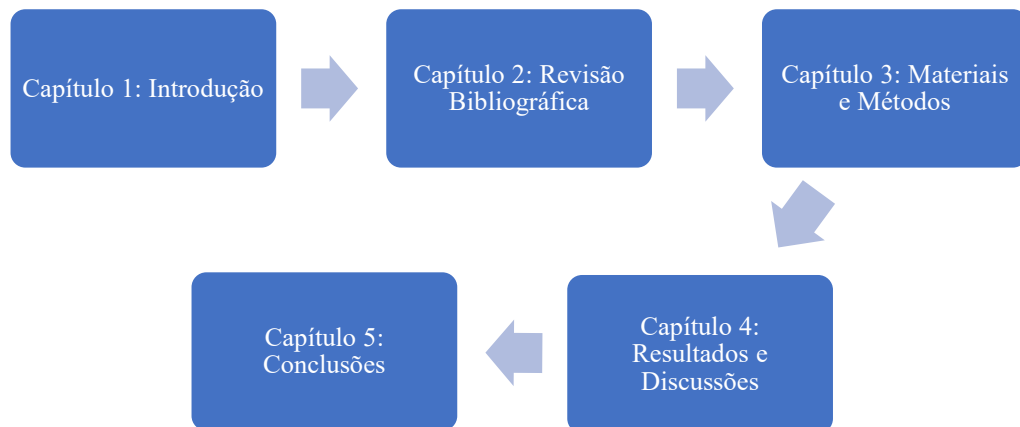
- a) submeter os fluidos de perfuração a diferentes tempos de envelhecimento acelerado e avaliar o impacto desse processo no perfil de sedimentação dos sólidos;
- b) investigar, por meio da TARG, a correlação entre o tempo de envelhecimento acelerado e a cinética de sedimentação dos sólidos nos fluidos de perfuração;
- c) caracterizar química e fisicamente os fluidos de perfuração antes e após o envelhecimento, identificando quais parâmetros são mais sensíveis à exposição térmica;

- d) Analisar as alterações nas propriedades reológicas dos fluidos após o envelhecimento, quantificando quais os maiores impactos do envelhecimento acelerado nas propriedades de reologia; e
- e) Avaliar, de forma isolada, a degradação térmica da goma xantana (principal viscosificante) sob diferentes temperaturas, correlacionando as alterações reológicas do polímero com o comportamento observado nos fluidos completos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, cujos conteúdos são resumidos a seguir:

Figura 1: Fluxograma da estrutura da dissertação.



Fonte: Autor, 2026.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais conceitos relacionados aos fluidos de perfuração, abordando suas funções, classificações e propriedades fundamentais. São discutidos, em especial, os critérios de seleção desses fluidos, os sistemas à base de água e de óleo, bem como as propriedades de densidade e reologia. Além disso, são apresentadas características relevantes para o desempenho dos fluidos de perfuração, como os processos de sedimentação, sua aplicação na indústria e do envelhecimento térmico sobre seu comportamento. Por fim, destaca-se a importância dos polímeros na formulação e no uso dos fluidos de perfuração, evidenciando o papel central da reologia na obtenção de sistemas adequados às exigências operacionais.

2.1. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO: VISÃO GERAL

2.1.1. CONCEITOS E FUNÇÕES

Os fluidos de perfuração constituem um dos principais componentes empregados no processo de perfuração de poços de petróleo. Durante a operação, esses fluidos são continuamente bombeados da superfície para o interior da coluna de perfuração, escoando até a broca e retornando à superfície pelo espaço anular, compreendido entre a coluna de perfuração e as paredes do poço (ASME, 2005). Como citado por Thomas (2001), a depender de sua composição, esses fluidos podem apresentar características de suspensão, emulsão ou dispersão coloidal.

Segundo Caenn *et.al* (2017), historicamente, a função primordial dos fluidos de perfuração consistia em atuar como meio de transporte para remoção dos detritos gerados durante a perfuração. Além disso, tem como uma de suas principais funções resfriar a broca durante a operação. Também, tinha a função de auxiliar no controle da pressão no fundo do poço, prevenindo ocorrências como *blowouts* (que são fluxos descontrolados de fluidos da formação rochosa para o interior do poço) (CAENN *et al.*, 2017). Com o avanço tecnológico e o aumento da complexidade das operações, esses fluidos passaram a desempenhar múltiplas

funções essenciais. Isso inclui o controle da pressão do poço, a estabilização das paredes, a remoção eficiente dos fragmentos de perfuração, bem como o resfriamento e a lubrificação da broca (WANG, 2021).

Além dessas, outras funções relevantes são atribuídas aos fluidos de perfuração: selamento de formações permeáveis, transmissão de energia hidráulica para ferramentas e brocas, minimização de danos ao reservatório, controle da corrosão, facilitação do processo de cimentação, inibição da migração de gases e redução dos impactos ambientais (ASME, 2005). Thomas (2001) ainda explica que se somam a essas a capacidade de manter os sólidos em suspensão durante períodos de repouso, a estabilidade química, a inércia em relação às rochas produtoras e a possibilidade de interpretações geológicas adequadas do material removido.

CAENN *et al.* (2017) destacam que, entre essas funções, três são particularmente críticas: a prevenção da migração de óleo e gás para formações permeáveis; o transporte eficiente dos cascalhos do fundo do poço até a superfície; e a formação de uma torta de filtração nas paredes do poço. O desempenho adequado dessas funções está diretamente associado ao sucesso da operação de perfuração.

A seleção do fluido mais adequado, portanto, depende de uma avaliação criteriosa das condições específicas de cada operação. A formulação e a escolha do fluido levam em consideração fatores como: o tipo de rocha a ser perfurada, a espessura da formação, a salinidade, a presença de água, a pressão de formação e a temperatura do poço (PARATE, 2021). Uma análise criteriosa desses parâmetros permite a utilização de fluidos mais compatíveis com as condições operacionais, resultando em ganhos de produtividade e redução de custos.

Entre os aspectos mais relevantes, destaca-se a capacidade de garantir a estabilidade do poço por meio do controle adequado da pressão de formação. Nesse contexto, Wang (2021) explica que o fluido de perfuração exerce a pressão hidrostática necessária para contrabalançar a pressão liberada durante a abertura do poço. Tal fator acaba prevenindo o colapso das paredes e contribuindo para a segurança operacional. Parate (2021) elucida que esse equilíbrio é particularmente crítico em poços submetidos a condições de altas pressões e temperaturas (HPHT), nos quais o fluido deve apresentar elevada densidade e composição estável para suportar ambientes extremos.

Além disso, é fundamental que os fluidos de perfuração apresentem características que minimizem danos ao meio ambiente. Essas características devem ser economicamente viáveis,

não devem comprometer a produtividade do processo e nem provocar a corrosão ou o desgaste excessivo dos equipamentos (CAENN *et al.*, 2017). Nesse contexto, Faisal *et. al* (2023) esclarece que os três parâmetros geralmente considerados mais relevantes na definição do fluido a ser utilizado são o custo, a performance operacional e o impacto ambiental associado.

Os parâmetros básicos de controle dos fluidos de perfuração incluem:

- propriedades reológicas;
- densidade;
- teor de sólidos;
- perda de fluido por infiltração nas formações (*fluid loss*); e
- propriedades químicas: como pH, alcalinidade e composição iônica (THOMAS, 2001).

Thomas (2001) argumenta que esses parâmetros podem ser classificados em: físicos (teor de sólidos, densidade, viscosidade, forças géis); e químicos, (pH, teores de cloreto, bentonita, cálcio, magnésio, potássio, alcalinidades e concentração de ácido sulfídrico), sendo todos rotineiramente monitorados em laboratório.

2.1.2. CLASSIFICAÇÃO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

De modo geral, Caenn *et al.* (2017) conceitua que os fluidos de perfuração são classificados de acordo com sua composição. São formulados a partir de uma base principal à qual são adicionados componentes capazes de conferir propriedades específicas ao sistema. Dessa forma, esses fluidos podem ser classificados como aquosos, não aquosos, à base de óleo, sintéticos ou gasosos (CAENN *et al.*, 2017).

Existem diversos tipos de fluidos de perfuração, que variam de acordo com sua base e com as propriedades conferidas pelos aditivos utilizados. A seleção adequada do fluido constitui um fator crítico no processo de perfuração, uma vez que exerce influência direta sobre os custos operacionais. Caenn *et al.* (2017) menciona que, em operações em águas profundas, caracterizadas por elevados investimentos, a escolha inadequada do fluido pode resultar não apenas em prejuízos econômicos significativos, mas também em impactos negativos na produtividade e na segurança do poço.

2.1.3. TIPOS DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Os fluidos à base de água (*Water-Based Fluids* – WBF) são definidos como sistemas cuja fase contínua é majoritariamente composta por água, à qual são adicionados aditivos químicos responsáveis por conferir propriedades específicas ao fluido (CAENN *et al.*, 2017; THOMAS, 2001). A água utilizada na formulação desses fluidos pode ser doce ou salgada, dependendo das condições operacionais e das exigências da perfuração.

Nos fluidos aquosos, a água desempenha papel fundamental ao atuar como meio de dispersão para substâncias coloidais, que são componentes essenciais para o controle das propriedades reológicas do sistema (THOMAS, 2001). Essas substâncias coloidais podem ser obtidas de diferentes formas, conforme a aplicação e o cenário operacional enfrentado pelo fluido de perfuração. Logo, as substâncias acabam exercendo funções diversas durante a perfuração, como a estabilização das paredes do poço e o controle da viscosidade e das forças géis.

Além da adição de sólidos dispersos, diferentes produtos químicos são incorporados aos fluidos à base de água. Esses produtos tem o objetivo de otimizar o desempenho operacional, controlar o pH, reduzir o volume de filtrado, aumentar a viscosidade, remover impurezas, mitigar a corrosão, atuar como antiespumantes e exercer ação bactericida (THOMAS, 2001).

Os fluidos à base de óleo são definidos como sistemas nos quais a fase contínua é constituída por óleo, podendo este ser diesel, óleo sintético, hidrocarbonetos líquidos, entre outros. Segundo Thomas (2001) a fase aquosa, quando presente, é composta por sólidos coloidais orgânicos ou inorgânicos. Além disso, tem-se a presença de emulsificantes, agentes alcalinizantes e pequenas quantidades de água. Embora os fluidos não aquosos apresentem desvantagens associadas ao elevado custo inicial e ao potencial impacto ambiental, seu uso pode ser justificado em determinadas condições operacionais. A escolha desse tipo de fluido se dá em função de vantagens como a baixa taxa de corrosão, o elevado poder de lubrificação da broca e a baixa solubilidade de sais inorgânicos (THOMAS, 2001).

Os fluidos de perfuração à base de óleo apresentam vantagens em determinados ambientes operacionais, especialmente em formações com elevado teor de argila. Nesses casos, Parate (2021) detalha que o uso de fluidos à base de água pode promover a hidratação das argilas, ocasionando instabilidades no poço e comprometendo a segurança da operação.

Os fluidos à base de ar, por sua vez, são aqueles em que um gás é utilizado como meio de perfuração. Nessa categoria, emprega-se principalmente ar comprimido ou nitrogênio, sendo essa alternativa indicada para situações específicas de perfuração, conforme as características da formação e as condições operacionais do poço (THOMAS, 2001).

2.1.4. ADITIVOS E SUAS FUNÇÕES

Devido à sua importância e às suas características específicas, os fluidos de perfuração são formulados com a adição de diferentes aditivos, responsáveis por conferir propriedades adequadas ao desempenho operacional. Esses aditivos atuam diretamente no controle da densidade, reologia, estabilidade coloidal e no desempenho do sistema sob condições severas de pressão e temperatura (THOMAS, 2001).

No final do século XIX e início do século XX, operações de perfuração nos campos de Corsicana (1890) e Spindletop (1901), no Texas, já empregavam fluidos naturais provenientes de argilas locais, evidenciando a consolidação do uso de fluidos de perfuração na perfuração rotativa (QUITIAN ARDILA, 2021).

De modo geral, os aditivos podem ser classificados em: viscosificantes (polímeros e bentonita); redutores de filtrado (CMC e dispersantes); emulsificantes; redutores de viscosidade (fosfatos e lignossulfonatos); agentes de peso (barita e carbonato de cálcio); e aditivos especiais, como controladores de pH, floculantes e inibidores de corrosão (LUMMUS; AZAR, 1986). A escolha e a concentração desses aditivos determinam não apenas as propriedades reológicas do fluido, mas também sua capacidade de manter partículas sólidas em suspensão, fator diretamente relacionado à estabilidade do sistema e à prevenção de sedimentação.

Entre os aditivos viscosificantes empregados em fluidos de perfuração à base de água, destaca-se a goma xantana (GX), cuja principal função está associada ao controle da viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, contribuindo para a manutenção de sólidos em suspensão durante períodos de repouso.

Estudos indicam que a estabilidade térmica da goma xantana está diretamente relacionada à força iônica dos cátions presentes e à capacidade antioxidante dos ânions na solução (MARTÍN-ALFONSO et al., 2021). A resistência térmica da GX tende a ser maior quando sua estrutura ordenada permanece como a conformação predominante em altas

temperaturas. Trabalhos anteriores demonstraram que soluções salinas (*brines*) atuam na proteção da GX contra a degradação térmica, ampliando a faixa de temperatura na qual ocorre a transição térmica e favorecendo um comportamento reológico do tipo gel fraco (MARTÍN-ALFONSO et al., 2021).

A goma xantana é um biopolímero desenvolvido pelo *United States Department of Agriculture* (USDA) na década de 1960, sendo o primeiro polissacarídeo bacteriano produzido em escala industrial (SPEERS; TUNG, 1986; KANG; PETTITT, 1993; MILAS; RINAUDO, 1986). Sua produção ocorre por meio da fermentação da bactéria *Xanthomonas campestris* em processo aeróbico submerso, realizado em meio estéril contendo carboidratos e cultura apropriada (IMESON, 1997; SPEERS; TUNG, 1986). Sua estrutura é composta por unidades repetitivas, incluindo um segmento formado por duas unidades de β -(1 $\rightarrow$ 4)-D-glicose, além de resíduos laterais característicos (BERCEA; MORARIU, 2020; BORGES; VENDRUSCOLO, 2008; IMESON, 1997). O processo envolve as etapas de pré-inóculo, inóculo, fermentação, pasteurização, remoção das células, precipitação, separação e secagem (LUVIELMO; SCAMPARINI, 2009).

Kang e Pettitt (1993) argumentam que os componentes químicos da goma xantana produzida industrialmente são equivalentes aos obtidos em condições naturais, não sendo possível distinguir entre ambas as formas de produção. Essa equivalência assegura que o comportamento reológico observado em aplicações industriais e laboratoriais esteja em concordância com as características do polímero, e não a variações decorrentes do método de obtenção.

A produção por fermentação confere vantagens como a independência de fatores externos (condições climáticas, influências econômicas e políticas), contribuindo para a estabilidade de fornecimento e a reprodutibilidade das formulações em escala industrial (IMESON, 1997). A estrutura primária, em especial o tipo de substituição presente na unidade externa de manose, exerce influência direta na estabilidade conformacional do polímero, afetando as interações intermoleculares responsáveis pela manutenção da estrutura helicoidal (BERCEA; MORARIU, 2020).

Em meio aquoso, a goma xantana assume uma estrutura helicoidal ordenada (dupla hélice). Quando submetida ao aquecimento, essa hélice sofre uma transição conformacional para um estado desordenado, processo que altera significativamente as propriedades reológicas do sistema. Durante o resfriamento, a estrutura helicoidal tende a se restabelecer, mas, caso a estrutura nativa tenha sido desnaturada, essa recuperação não ocorre de forma completa,

resultando na formação de uma estrutura parcialmente reticulada preservada pelo entrelaçamento das hélices (BERCEA; MORARIU, 2020; IMESON, 1997).

Em soluções diluídas (0,1 a 0,3% em água destilada), a transição térmica ocorre em temperaturas próximas a 40°C (IMESON, 1997). A transição do estado nativo para o desnaturado é irreversível, enquanto a transição do estado renaturado para o desnaturado é reversível. A temperatura de transição depende da concentração da goma, da força iônica do meio e do teor de ácido pirúvico presente nas macromoléculas (IMESON, 1997).

As propriedades marcantes da goma xantana estão associadas à sua conformação rígida do tipo bastonete, aliada ao elevado peso molecular (estimado na faixa de 15 a 50×10^6), o que favorece a formação de uma rede tridimensional eficiente em baixas taxas de cisalhamento (KANG; PETTITT, 1993; IMESON, 1997).

As soluções de goma xantana apresentam comportamento pseudoplástico (shear-thinning), caracterizado por elevada viscosidade aparente na ausência de cisalhamento, com redução progressiva da viscosidade à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, devido ao alinhamento das cadeias poliméricas na direção do escoamento (BORGES; VENDRUSCOLO, 2008; CHALLEN, 1993; KANG; PETTITT, 1993).

Quando o cisalhamento é cessado, a solução recupera quase imediatamente seu valor inicial de viscosidade, evidenciando a natureza predominantemente reversível das interações estruturais do sistema. O fenômeno de histerese não é observado de forma significativa, uma vez que tanto o afinamento por cisalhamento quanto a recuperação da viscosidade ocorrem de maneira praticamente instantânea (KANG; PETTITT, 1993; BORGES; VENDRUSCOLO, 2008).

Em concentrações moderadas, soluções de goma xantana apresentam aspecto semelhante ao de um gel em repouso, apesar de exibirem baixa resistência à mistura e ao bombeamento, característica que justifica sua eficiência operacional (KANG; PETTITT, 1993).

As propriedades reológicas de hidrocoloides em solução dependem de diversos fatores, tais como concentração do componente ativo, temperatura, grau de dispersão, processo de dissolução e presença de sais (TAHERIAN; TRIGUI; RAMASWAMY, 2001). Dessa forma, pequenas variações nas condições de preparo podem resultar em diferenças significativas na viscosidade aparente e na estrutura do sistema.

A goma xantana apresenta elevada resistência à degradação enzimática, permitindo sua utilização em sistemas contendo diversas enzimas comuns (IMESON, 1997). Além disso,

fatores como pH na faixa de 3 a 10 e concentrações de sais superiores a 0,1% exercem influência limitada sobre a viscosidade aparente das soluções (SPEERS; TUNG, 1986; KANG; PETTITT, 1993). Essa relativa estabilidade contribui para sua ampla aplicação em fluidos de perfuração.

A goma xantana apresenta interação intensa com a água quando comparada a outros hidrocoloides, sendo completamente solúvel tanto em água fria quanto em água quente, com caráter fortemente hidrofílico (CHALLEN, 1993; KANG; PETTITT, 1993; IMESON, 1997). Pode ser dissolvida diretamente em várias soluções ácidas (ácido sulfúrico a 5%, ácido nítrico a 5%, ácido acético), produzindo soluções estáveis por vários meses à temperatura ambiente. É também solúvel em soluções de hidróxido de sódio e compatível com a maioria dos sais e alguns álcoois, mas apresenta insolubilidade na maioria dos solventes orgânicos (KANG; PETTITT, 1993).

A hidratação da goma xantana refere-se à facilidade com que as partículas individuais se expandem no meio aquoso, promovendo o desenvolvimento da viscosidade. O tempo necessário para essa hidratação depende da eficiência da dispersão, do tamanho das partículas e da presença de outros componentes na formulação (IMESON, 1997; CHALLEN, 1993).

No contexto dos fluidos de perfuração, a goma xantana é amplamente empregada em formulações à base de água, sendo eficaz na remoção de cascalhos e rejeitos gerados durante a operação. Sua eficiência está associada à capacidade de promover elevada viscosidade em baixas taxas de cisalhamento, favorecendo a suspensão de partículas sólidas quando o fluido se encontra em regime próximo ao repouso. Adicionalmente, contribui para a redução da pressão de fricção em regiões de escoamento turbulento (reduções da ordem de 40 a 60%), otimizando o desempenho dos equipamentos de perfuração (KANG; PETTITT, 1993).

A goma xantana forma ligações intermoleculares não covalentes entre cadeias adjacentes, resultando em elevada viscosidade em regimes de baixo cisalhamento (WANG, 2021). Apresenta ainda compatibilidade com a maioria dos aditivos utilizados em fluidos de perfuração, elevada tolerância a altas concentrações de sais (especialmente água do mar) e favorece maiores taxas de penetração da broca, em função de sua baixa viscosidade em condições de alto cisalhamento (KANG; PETTITT, 1993).

A goma xantana apresenta viscoplasticidade, permitindo a obtenção de tensões de escoamento relativamente altas mesmo em baixas concentrações, propriedade fundamental para sistemas que requerem estabilidade estrutural e resistência à sedimentação ao longo do tempo (IMESON, 1997). Mesmo em baixas concentrações, as soluções exibem viscosidades elevadas

em baixas taxas de cisalhamento, com afinamento por cisalhamento mais pronunciado do que em outras gomas (IMESON, 1997).

A etapa de homogeneização é relevante, pois garante a representatividade da amostra analisada, evitando a influência da sedimentação de partículas sólidas e da formação de aglomerados poliméricos, que podem comprometer a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados experimentais (THOMAS, 2001).

2.1.5. DENSIDADE DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

A densidade é um dos parâmetros de maior relevância dos fluidos de perfuração. No contexto da perfuração de poços de petróleo, essa propriedade desempenha papel fundamental no controle e na segurança das operações, pois influencia diretamente a pressão hidrostática exercida pela coluna estática de fluido. Essa pressão é descrita pela Equação 1 (WANG, 2021), na qual (h) corresponde à profundidade da coluna de fluido, (g) à aceleração da gravidade, (ρ) à densidade do fluido e P_{atm} à pressão atmosférica.

$$P = \rho gh + P_{atm} \quad (1)$$

Thomas (2001) estabelece que a densidade deve ser mantida dentro de limites estabelecidos pela pressão de poros da formação (valor mínimo) e pela pressão de fratura (valor máximo). O aumento da densidade dos fluidos de perfuração é, em geral, obtido por meio da adição de agentes densificantes, o que eleva o teor de sólidos do sistema e pode dificultar o processo de filtração do fluido, além de impactar outras propriedades operacionais (ASME, 2005).

Por outro lado, a prática de elevar a densidade acima do mínimo necessário, embora comum para garantir segurança, pode ser prejudicial: o excesso de densidade aumenta a pressão sobre as paredes do poço, favorecendo fraturas na formação e comprometendo a integridade do poço (CAENN et al., 2017).

2.1.6. ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO

A maioria dos fluidos de perfuração apresenta comportamento reológico não newtoniano, o que implica que sua descrição não pode ser realizada apenas por modelos clássicos baseados na viscosidade constante. Ainda assim, é possível caracterizar de forma adequada seu escoamento por meio de parâmetros hidrodinâmicos e reológicos que permitam sua descrição, controle e aplicação durante as operações de perfuração (CAENN et al., 2017).

O escoamento pode ser classificado, de modo geral, em dois regimes principais: laminar e turbulento. No regime laminar o fluido se desloca em camadas organizadas com movimento relativamente ordenado e previsível, havendo predominância dos efeitos viscosos. Em contraste, o regime turbulento é caracterizado por escoamento desordenado com intensa mistura e flutuações aleatórias de velocidade, sendo governado principalmente por efeitos inerciais (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2001).

No regime laminar, a transferência de quantidade de movimento ocorre predominantemente por cisalhamento entre camadas adjacentes do fluido. Para fluidos newtonianos, essa interação pode ser descrita pela lei da viscosidade de Newton, na qual a tensão de cisalhamento é proporcional ao gradiente de velocidade.

Entretanto, para fluidos não newtonianos, como os fluidos de perfuração, essa relação não é linear. Isso exige o uso de modelos reológicos específicos para representar o comportamento do sistema. Já no regime turbulento, a transferência de quantidade de movimento ocorre não apenas por cisalhamento, mas também pelo movimento caótico das partículas do fluido tornando a análise mais complexa (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2001). A transição entre os regimes laminar e turbulento é usualmente avaliada por meio do número de Reynolds, cujo valor crítico depende das propriedades reológicas do fluido e das condições geométricas do escoamento.

2.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO DE FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

2.2.1. FUNDAMENTOS DE REOLOGIA E REOMETRIA

A reologia é a ciência que estuda a deformação e o escoamento dos materiais (BARNES; HUTTON; WALTERS, 1989; ASME, 2005; MEZGER, 2006). Essa área do conhecimento é fundamental para a avaliação da qualidade de produtos, para o projeto de processos e para a

realização de cálculos de engenharia. Os modelos reológicos desenvolvidos permitem descrever matematicamente o comportamento dos materiais sob diferentes condições de solicitação mecânica, sendo amplamente utilizados na otimização de processos industriais. A compreensão dos diferentes regimes de escoamento é essencial para o adequado dimensionamento de bombas, tubulações e equipamentos associados (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021), especialmente quando se tratam de fluidos com comportamento não newtoniano.

De modo geral, distinguem-se dois tipos básicos de escoamento: o escoamento por cisalhamento e o escoamento extensional (BARNES, 2000). No escoamento por cisalhamento, as camadas do fluido deslizam umas sobre as outras, resultando na deformação do material. Já no escoamento extensional, os elementos adjacentes se aproximam ou se afastam entre si, promovendo o alongamento ou a compressão do fluido. Embora ambos os regimes possam ocorrer em sistemas reais, a maioria das medições reológicas convencionais é realizada sob condições de cisalhamento, uma vez que esse tipo de escoamento é predominante em operações envolvendo transporte por tubulações e bombeamento.

No contexto dos fluidos de perfuração, a reologia descreve o comportamento do escoamento e permite analisar a deformação do fluido sob diferentes condições operacionais. Como esses fluidos apresentam comportamento predominantemente não newtoniano, seus parâmetros reológicos variam com a taxa de cisalhamento aplicada. Tais parâmetros influenciam diretamente o cálculo das perdas de carga ao longo das tubulações, a pressão necessária para circulação e a eficiência do transporte dos cascalhos do fundo do poço até a superfície. Dessa forma, o adequado conhecimento reológico é fundamental para garantir estabilidade operacional e evitar problemas como sedimentação de sólidos e aumento excessivo de pressão durante a perfuração (ASME, 2005; THOMAS, 2001).

Barnes (2000) detalha que o gradiente de velocidade na direção perpendicular ao escoamento é definido como taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), enquanto a força por unidade de área associada ao escoamento é denominada tensão de cisalhamento (τ). A obtenção experimental desses parâmetros é realizada por meio da reometria, que compreende o conjunto de técnicas e instrumentos utilizados para medir propriedades reológicas de materiais sob condições controladas de deformação (MEZGER, 2006).

A tensão de cisalhamento, em uma abordagem simplificada para casos unidirecionais, é definida como a força aplicada (F) por unidade de área (A) durante a deformação do material

avaliado, sendo expressa na unidade de Pascal (Pa) e descrita pela relação da Equação 2 (Hibbeler, 2004):

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2)$$

Porém, é importante destacar que o estado geral de tensões em um ponto é descrito por um tensor de segunda ordem com 9 componentes (3 normais e 6 cisalhantes, que se reduzem a 6 independentes devido à simetria do tensor tensão de Cauchy). Nesse contexto, a tensão de cisalhamento corresponde às componentes fora da diagonal principal do tensor.

Já a taxa de cisalhamento, em situações unidimensionais simplificadas, é definida como a razão entre a velocidade do fluido (v) e a distância entre as camadas em movimento relativo (h), sendo expressa em unidades de s^{-1} , conforme representado na Equação 3 (Hibbeler, 2004):

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad (3)$$

No entanto, assim como a tensão, a taxa de deformação é, na verdade, um tensor de segunda ordem com 9 componentes (três taxas de deformação normais e seis taxas de cisalhamento), que se reduz a 6 componentes independentes devido à simetria para fluidos newtonianos.

A velocidade de um fluido pode variar com a posição e com o tempo, dependendo de sua localização no espaço e, eventualmente, de outras coordenadas. Em escoamentos por cisalhamento, essa modificação ocorre principalmente na direção perpendicular ao movimento das camadas do fluido, resultando na formação de um gradiente de velocidade. A partir dessa observação, Newton estabeleceu que a tensão de cisalhamento é proporcional à mudança da velocidade em função da distância, conceito conhecido como gradiente de velocidade (MACOSKO, 1994). Essa relação constitui a base da definição clássica de viscosidade dinâmica para fluidos newtonianos, nos quais a razão entre a tensão aplicada e o gradiente de velocidade permanece constante.

O cisalhamento desempenha papel central na reologia dos fluidos de perfuração, uma vez que influencia diretamente o comportamento viscoso do sistema durante as operações de circulação e bombeamento. Nesse contexto, a viscosidade de cisalhamento constitui o parâmetro reológico mais frequentemente monitorado, sendo associada à resistência do fluido ao escoamento sob uma determinada taxa de deformação. Trata-se de um dos principais

parâmetros de controle nas operações de perfuração, pois impacta diretamente as perdas de carga, a eficiência de transporte de sólidos e a estabilidade do sistema.

Do ponto de vista mecânico, a viscosidade aparente (η) pode ser definida como a razão entre a tensão de cisalhamento aplicada ao fluido e a taxa de cisalhamento imposta, conforme a expressão (ASME, 2005; MEZGER, 2006):

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (4)$$

A viscosidade aparente é um parâmetro fortemente dependente da temperatura, e o efeito térmico em líquidos e gases está diretamente relacionado às diferenças em suas estruturas moleculares. Para a maioria dos líquidos, observa-se redução da viscosidade com o aumento da temperatura, uma vez que a elevação térmica enfraquece as forças coesivas intermoleculares, facilitando o movimento relativo entre as camadas do fluido. Dessa forma, o aumento da temperatura resulta em menor resistência ao escoamento e, conseqüentemente, em menores valores de viscosidade. Em contrapartida, para a maioria dos gases, a viscosidade tende a aumentar com o incremento da temperatura, em função do aumento da energia cinética molecular (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021).

Os fluidos de perfuração não apresentam um valor único de viscosidade aparente, uma vez que essa propriedade depende da taxa de cisalhamento à qual o fluido é submetido. Fluidos que exibem elevada viscosidade em altas taxas de cisalhamento tendem a promover maior retenção de fluido nos cascalhos, reduzindo a eficiência de equipamentos que operam sob essas condições. Por outro lado, viscosidades elevadas em baixas taxas de cisalhamento podem comprometer o desempenho de equipamentos utilizados em regimes de baixo cisalhamento (ASME, 2005; WANG, 2021). Wang (2021) detalha que uma característica reológica marcante desses fluidos é o comportamento pseudoplástico, no qual a viscosidade diminui à medida que a taxa de cisalhamento aumenta, permitindo conciliar capacidade de suspensão com eficiência de bombeamento.

No contexto operacional, valores muito baixos de viscosidade podem comprometer a eficiência de equipamentos como centrífugas, reduzindo a capacidade de separação de sólidos finos. Por outro lado, viscosidades excessivamente elevadas tendem a prejudicar o desempenho de sistemas de separação sólido-líquido, como telas vibratórias, devido à maior retenção de lama e à dificuldade de drenagem do fluido (ASME, 2005). Dessa forma, o controle adequado

da viscosidade constitui um parâmetro crítico para o equilíbrio entre transporte eficiente de cascalhos e desempenho dos equipamentos de superfície.

De modo geral, o escoamento dos fluidos pode ser classificado em dois regimes principais: laminar e turbulento. No regime laminar, o fluxo ocorre em baixas velocidades, com camadas organizadas e movimento previsível. Já no regime turbulento, predominante em altas velocidades, o escoamento é desordenado e governado principalmente por efeitos inerciais (WANG, 2021).

Além disso, alguns fluidos apresentam simultaneamente comportamento viscoso e elástico, sendo classificados como viscoelásticos. Esses materiais combinam características associadas à dissipação de energia, típicas de líquidos, com capacidade de armazenamento temporário de energia, característica de sólidos. Fluidos de perfuração que exibem afinamento por cisalhamento frequentemente apresentam viscoelasticidade, o que pode influenciar fenômenos como formação de estruturas transitórias e resposta sob solicitações rápidas. Em determinadas condições operacionais, essa característica pode impactar negativamente a eficiência de equipamentos como centrífugas, dificultando a separação sólido-líquido (ASME, 2005).

2.2.2. CLASSIFICAÇÃO REOLÓGICA

2.2.2.1. FLUIDOS NEWTONIANOS E NÃO-NEWTONIANOS

Segundo Chhabra e Richardson (2008), um fluido newtoniano pode ser definido como aquele cuja viscosidade aparente é constante, ou seja, não depende da tensão aplicada, sendo, portanto, uma propriedade intrínseca do fluido. Esses fluidos obedecem à lei de Newton da viscosidade, na qual a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, e a viscosidade permanece constante e independente da taxa de cisalhamento aplicada ao sistema (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021).

Para experimentos conduzidos sob condições de temperatura e pressão constantes, um fluido apresenta comportamento newtoniano quando atende a critérios específicos. No escoamento por cisalhamento simples, a única tensão presente é a de cisalhamento. Ou seja, a

viscosidade não varia com a taxa de deformação imposta, permanecendo constante ao longo do tempo de cisalhamento.

Esse comportamento pode ser representado matematicamente pela Equação 5, em que τ representa a tensão de cisalhamento (N/m^2), μ a viscosidade dinâmica ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) e γ a taxa de cisalhamento (s^{-1}):

$$\tau = \mu\gamma \quad (5)$$

A caracterização de fluidos não newtonianos envolve a avaliação de propriedades como viscosidade aparente, tensões normais e respostas viscoelásticas, sendo esse conjunto de análises denominado reometria (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2001). Nesse contexto, a reologia dedica-se ao estudo da deformação e do escoamento de materiais que não obedecem à lei de Hooke. Além disso, como de fluidos que não seguem a lei de Newton da viscosidade, fornecendo a base teórica necessária para a modelagem e interpretação de seu comportamento em diferentes regimes de escoamento.

Para fluidos newtonianos, como a água, a viscosidade é independente da taxa de cisalhamento. Segundo Asme (2005), isso ocorre porque ao se aumentar a velocidade de escoamento de um fluido newtoniano em um tubo a tensão de cisalhamento cresce de forma proporcional, mantendo a viscosidade constante ao longo do escoamento.

Em contraste, os fluidos não newtonianos apresentam curvas de escoamento não lineares. Nesses fluidos, a viscosidade aparente (definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento) não permanece constante. Isso ocorre mesmo sob condições de temperatura e pressão fixas, dependendo da taxa de cisalhamento e da geometria do escoamento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Dessa forma, os fluidos não newtonianos não obedecem à lei de Newton da viscosidade, uma vez que sua viscosidade varia com a taxa de cisalhamento aplicada ao sistema. Por essa razão, utiliza-se o termo viscosidade aparente para descrever seu comportamento reológico (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021). Dentre os fluidos não newtonianos, destacam-se aqueles com comportamento pseudoplástico (afinamento ao cisalhar) e, em alguns casos, também com características tixotrópicas (dependência temporal da viscosidade).

No caso dos fluidos de perfuração que apresentam comportamento não newtoniano, a viscosidade depende diretamente da taxa de cisalhamento aplicada. Assim, a equação

constitutiva é expressa em termos de uma viscosidade efetiva definida como $\mu_e = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$, evidenciando de forma clara a dependência reológica em relação ao regime de escoamento imposto (ASME, 2005).

2.2.2.2. PSEUDOPLASTICIDADE

Os fluidos pseudoplásticos são fluidos não newtonianos com viscosidade aparente independente do tempo, cuja viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Esse comportamento ocorre porque, sob cisalhamento, moléculas longas e inicialmente entrelaçadas tendem a se desenrolar e se alinhar na direção do escoamento (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021). Isso reduz o atrito interno e, conseqüentemente, a viscosidade do sistema.

Para fluidos pseudoplásticos, o índice de comportamento do escoamento apresenta valor inferior à unidade. Quanto menor esse índice, mais pronunciado é o caráter pseudoplástico do fluido, refletindo uma maior sensibilidade da viscosidade à variação da taxa de cisalhamento (RAO, 1977).

2.2.2.3. TIXOTROPIA

Barnes (1997) conceitua que a tixotropia tem sido amplamente estudada devido à sua relevância no desenvolvimento de produtos com melhor desempenho operacional. Esse parâmetro tem uma grande importância, uma vez que esse comportamento combina facilidade de escoamento sob movimento com maior resistência estrutural em condições de repouso. Esse tipo de resposta reológica é particularmente importante em sistemas estruturados, nos quais a organização interna do material pode ser alterada pela aplicação de cisalhamento.

Um fluido é classificado como tixotrópico quando, ao ser submetido a uma taxa de cisalhamento constante, sua viscosidade aparente diminui ao longo do tempo (CHHABRA; RICHARDSON, 2008; WANG, 2021; BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021). Nesse caso, a aplicação contínua do cisalhamento promove a ruptura progressiva da estrutura interna do material. Isto acaba reduzindo gradualmente sua resistência ao escoamento. Após a interrupção

do cisalhamento, a viscosidade tende a se restabelecer com o tempo à medida que a estrutura interna é parcialmente reconstruída (BARNES, 2000).

De modo geral, materiais que apresentam afinamento por cisalhamento (pseudoplasticidade) podem exibir comportamento tixotrópico. Entretanto, existe uma distinção conceitual relevante entre esses fenômenos (BARNES, 1997). Na pseudoplasticidade, a viscosidade diminui em função do aumento da taxa de cisalhamento aplicada, sendo a resposta essencialmente dependente da intensidade da deformação. Já na tixotropia, a variação da viscosidade ocorre em função do tempo de aplicação do cisalhamento, refletindo um processo estrutural não instantâneo. Assim, a recuperação da viscosidade após a interrupção da agitação apresenta um retardo, evidenciando dependência temporal do comportamento reológico (BARNES, 1997; WANG, 2021).

Esse comportamento pode ser observado experimentalmente por meio da formação de histerese em curvas de fluxo obtidas com varredura crescente e decrescente de taxa de cisalhamento. Isso indica que a trajetória da viscosidade durante o aumento da deformação difere daquela observada em sua redução (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). A área desse laço está associada ao grau de estruturação e à cinética de reconstrução do sistema.

Em contraste, fluidos reopéticos apresentam comportamento oposto ao dos tixotrópicos. São caracterizados pelo aumento da viscosidade aparente com o tempo de aplicação do cisalhamento. Nesses casos, a estrutura interna é progressivamente fortalecida sob deformação contínua, retornando ao estado inicial após a interrupção da solicitação mecânica (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021; BARNES, 2000).

2.2.2.4. FLUIDOS VISCOPLÁSTICOS

Esse tipo de fluido apresenta um comportamento caracterizado pela existência de uma tensão de escoamento τ_0 , que deve ser superada para que o material passe a escoar (CHHABRA; RICHARDSON, 2008). Quando a tensão aplicada é inferior a τ_0 o material não flui, comportando-se como um corpo rígido. No entanto, ao se ultrapassar esse valor crítico, o fluido inicia o escoamento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Outra característica relevante dos fluidos viscoplásticos é a redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação. Em condições de taxas de deformação muito

baixas, a viscosidade aparente é efetivamente infinita no instante imediatamente anterior ao início do escoamento, refletindo a resistência inicial do material ao movimento (CHHABRA; RICHARDSON, 2008).

Macosko (1994) define um fluido viscoplástico como aquele que apresenta nenhuma ou pouca deformação até que um determinado nível de tensão seja atingido, iniciando o escoamento apenas quando uma força mínima (denominada tensão de escoamento) é aplicada. Uma vez superada essa tensão, o material passa a fluir com maior facilidade.

Os fluidos de Bingham são um caso particular de fluidos viscoplásticos nos quais, após o vencimento da tensão de escoamento, o comportamento do fluido torna-se linear (newtoniano), com relação linear entre tensão de cisalhamento e taxa de deformação (BALDINO; LUPI; GABRIELE, 2021). Em contrapartida, fluidos do tipo Herschel-Bulkley apresentam comportamento não linear após a tensão de escoamento.

2.2.2.5. FLUIDOS VISCOELÁSTICOS

Muitos materiais apresentam comportamentos que não são exclusivamente sólidos nem puramente viscosos, manifestando simultaneamente ambas características. Esses materiais se deformam elasticamente quando submetidos a uma tensão, mas também apresentam escoamento ao longo do tempo (CHHABRA; RICHARDSON, 2008; BARNES, 1997; ASME, 2005).

Quando submetidos a cisalhamento dentro do regime linear, esses materiais exibem uma resposta dependente do tempo. Logo, o comportamento observado está relacionado à duração da aplicação da força.

Em intervalos de tempo curtos, o material responde predominantemente de forma elástica. Entretanto, para tempos mais longos, passa a escoar como um fluido viscoso (BARNES, 1997).

Outro aspecto relevante é que materiais que apresentam afinamento por cisalhamento tendem a exibir comportamento tixotrópico até certo grau. Esse efeito particularmente significativo acontece quando o tempo necessário para a recuperação estrutural é maior do que o tempo disponível para a medição ou processamento do material (BARNES, 1997).

Esses materiais são denominados viscoelásticos, justamente por apresentarem, de forma combinada, propriedades elásticas e viscosas. Cabe ressaltar que os comportamentos de deformação elástica perfeita e de fluxo viscoso ideal representam apenas casos limite dentro do espectro do comportamento viscoelástico (CHHABRA; RICHARDSON, 2008; ASME, 2005).

2.3. MODELOS MATEMÁTICOS

É amplamente reconhecido que os fluidos de perfuração mais utilizados apresentam comportamento de afinamento por cisalhamento (*shear-thinning*), no qual a viscosidade diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. Em função desse comportamento, Asme (2005) explica que diversos modelos reológicos foram desenvolvidos com o objetivo de descrever matematicamente a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento nesses sistemas.

Dentre os modelos mais empregados na caracterização reológica de fluidos de perfuração, destacam-se os modelos Plástico de Bingham, *Power Law* e Herschel–Bulkley (ASME, 2005).

O modelo Plástico de Bingham assume a existência de uma tensão de escoamento mínima abaixo da qual o fluido não apresenta escoamento. Após superado esse limite, o comportamento é linear em relação à taxa de cisalhamento, e a Equação 6, onde μ_e é a viscosidade efetiva, $\dot{\gamma}$ é a taxa de cisalhamento, μ_p é a viscosidade plásticas, τ_0 é a tensão de escoamento necessária para iniciar o escoamento (ASME, 2005):

$$\mu_e = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \mu_p + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (6)$$

trata-se de um modelo amplamente utilizado na indústria devido à sua simplicidade e à boa representação do comportamento em faixas elevadas de taxa de cisalhamento. Entretanto, em baixas taxas de cisalhamento, tende a superestimar a viscosidade, tornando-se menos representativo nessas condições (ASME, 2005). Já o modelo de potência (*Power Law*) definida pela Equação 7, onde τ é a tensão de cisalhamento, K é o índice de consistência e n é o índice de comportamento do fluido:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (7)$$

quando $n < 1$ o fluido apresenta comportamento pseudoplástico; quando $n > 1$, comportamento dilatante; e quando $n = 1$, comportamento newtoniano. Apesar de representar

adequadamente o afinamento por cisalhamento em uma faixa intermediária de taxas, o modelo subestima a viscosidade em baixas taxas de cisalhamento e não contempla a existência de tensão de escoamento, uma vez que para $\dot{\gamma} = 0$ resulta em $\tau = 0$ (ASME, 2005).

A partir das limitações observadas na representação de fluidos em baixas taxas de cisalhamento pelo modelo de *Power Law*, desenvolveu-se um modelo capaz de suprir essa lacuna (ASME, 2005). Nesse contexto, o modelo de Herschel–Bulkley pode ser entendido como uma extensão e otimização dos modelos Plástico de Bingham e *Power Law*. Isso porque o modelo representado na Equação 8 inclui em sua formulação um termo adicional correspondente à tensão de escoamento necessária para que o fluido passe a escoar (ASME, 2005).

$$\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}^n \quad (8)$$

Este modelo é amplamente utilizado na descrição de fluidos de perfuração por apresentar maior flexibilidade na representação do comportamento reológico em ampla faixa de taxas de cisalhamento (WANG, 2021), sendo particularmente adequado para sistemas que exibem simultaneamente tensão de escoamento e afinamento por cisalhamento.

2.4. EFEITOS DO ENVELHECIMENTO TÉRMICO E DA TEMPERATURA NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

O envelhecimento de fluidos de perfuração constitui uma etapa de grande relevância na indústria. Esse procedimento permite simular em laboratório as condições similares às quais esses fluidos são submetidos no interior dos poços, especialmente no que se refere às elevadas temperaturas e aos tempos prolongados de exposição. Os fluidos formulados na superfície não reproduzem fielmente o ambiente do fundo do poço, em razão das diferenças significativas de pressão e temperatura existentes ao longo da coluna de perfuração (OLISE; EKAETTE; OKOLOGUME, 2017). Dessa forma, torna-se essencial investigar o comportamento das propriedades do fluido em condições operacionais. Para assim verificar se estas permanecem compatíveis com aquelas estabelecidas durante a etapa de formulação.

O processo de envelhecimento pode ser conduzido de acordo com os procedimentos recomendados pelo *American Petroleum Institute* (API). A API estabelece metodologias para

o envelhecimento laboratorial de fluidos de perfuração à base de água e óleo. As metodologias específicas nas normas API RP 13B-1 (fluidos à base de água) e API RP 13B-2 (fluidos à base de óleo) recomendam o uso de células pressurizadas (*aging cells*) em fornos rotativos (*roller ovens*). O envelhecimento pode ser realizado em regime estático (amostra em repouso, simulando períodos sem circulação) ou dinâmico (amostra rolada, simulando condições de circulação), sob temperaturas elevadas e tempo mínimo de 16 horas, dependendo do objetivo do estudo e das condições que se deseja simular (OLISE; EKAETTE; OKOLOGUME, 2017). A metodologia recomendada pela API RP 13B-1 foi a base utilizada para o trabalho.

Entre os primeiros trabalhos dedicados à avaliação dos efeitos da temperatura em fluidos de perfuração, destaca-se o estudo de Gray *et al.* (1952). Neste estudo, os autores observaram que fluidos aquosos tratados com cal apresentavam intensa gelificação ou até solidificação quando submetidos a temperaturas superiores a 150°C. Os autores também concluíram que, em altas temperaturas, a pressão exerce pouca influência sobre a viscosidade do fluido, enquanto o aumento da temperatura tende a elevar sua acidez.

Posteriormente, Srini-Vasan *et al.* (1958) avaliaram a influência da temperatura no comportamento reológico de fluidos de perfuração à base de água, considerando temperaturas de 25, 50, 70 e 80°C. Os resultados evidenciaram uma redução da viscosidade com o aumento da temperatura. Além disso, os autores observaram que a razão entre a viscosidade do fluido de perfuração e a da água aumentava à medida que a temperatura se elevava.

Hiller *et al.* (1963) identificaram dois comportamentos distintos em suspensões de montmorilonita sódica submetidas a condições de alta pressão e temperatura. Os autores verificaram que o aumento da temperatura promove a redução da viscosidade plástica e da tensão limite de escoamento. Já o aumento da pressão resulta apenas em um leve acréscimo desses parâmetros reológicos.

Annis *et al.* (1967) investigaram os efeitos combinados do tempo e da temperatura sobre a viscosidade aparente e a tensão limite de escoamento. Os fluidos estudados foram fluidos de perfuração à base de água formulados com bentonita. Os autores observaram que o aumento da temperatura leva à redução da viscosidade aparente, enquanto a tensão de escoamento tende a aumentar. Adicionalmente, verificou-se que a presença de eletrólitos, como o NaCl, em ensaios realizados a 150°C, promove um aumento significativo da tensão de cisalhamento quando comparada a fluidos formulados sem sal.

Na década de 1980, Chesser e Enright *et al.* (1980) destacaram os desafios associados à perfuração de poços em condições de alta pressão e alta temperatura (HPHT). À época, a aplicação de fluidos de perfuração à base de água era limitada pela ausência de aditivos capazes de manter propriedades reológicas adequadas sob temperaturas elevadas e em meios com alta concentração de eletrólitos. Além disso, os autores ressaltaram a inexistência de métodos padronizados para avaliar a instabilidade dos componentes dos fluidos de perfuração.

Al-Marhoun e Rahman (1988) observaram que o aumento inicial da viscosidade aparente, seguido da redução gradual da tensão limite de escoamento com o acréscimo da temperatura, está associado à degradação dos polímeros e à consequente desidratação das plaquetas de argila. Segundo os autores, a degradação polimérica reduz a capacidade de floculação das plaquetas. Isso favorece a aproximação entre elas e o predomínio de forças atrativas, resultando em uma estrutura mais dispersa com contatos do tipo borda-face e formação de géis.

Ali e Marhoun (1990) conduziu um estudo pioneiro sobre a influência de condições severas de temperatura e pressão nas propriedades de fluidos de perfuração à base de água. Para isso utilizou um viscosímetro *HPHT Fann Model 70*. Foram avaliadas temperaturas de até 255°C e pressões de até 700 bar. Os resultados mostraram que o aumento da temperatura promoveu a redução da viscosidade aparente e das tensões limite de escoamento, tanto estática quanto dinâmica. Em contrapartida, o aumento da pressão resultou em elevação da viscosidade aparente e da tensão limite de escoamento dinâmica.

A partir da década de 2000, os estudos reológicos em condições *HPHT* passaram a ocupar posição de destaque na literatura científica, refletindo-se em um crescimento expressivo no número de artigos, dissertações e teses publicados (Mello, 2020). Mello (2020) destaca que esse avanço foi impulsionado tanto pelo aumento da demanda da indústria do petróleo quanto pelo desenvolvimento de equipamentos mais robustos como viscosímetros e reômetros capazes de operar com precisão e confiabilidade em ambientes extremos de pressão e temperatura.

Nesse contexto, Hamed e Belhadri (2009) analisaram dois fluidos de perfuração à base de água formulados com diferentes biopolímeros: escleroglucana e goma xantana. Os autores observaram que ambos os sistemas apresentaram comportamento pseudoplástico, caracterizado por baixa tensão limite de escoamento, contribuindo para uma melhor compreensão da atuação química dos aditivos nesses sistemas.

Amani e Al-Jubouri (2012) investigaram a influência da salinidade no comportamento reológico de fluidos de perfuração à base de água contendo polímeros, barita, cal e diferentes eletrólitos (NaCl e KCl). Os resultados indicaram que, em condições ambiente, o fluido isento de sais apresentou comportamento pseudoplástico. Entretanto, sob pressões e temperaturas elevadas (acima de 241 bar e 232°C), passou a apresentar comportamento do tipo Bingham. Já os fluidos contendo sais exibiram respostas reológicas distintas, evidenciando o papel dos eletrólitos no desempenho do fluido sob condições severas.

William *et al.* (2014) avaliaram a aplicação de nanofluidos em fluidos de perfuração à base de água sob condições HPHT, utilizando nanopartículas de CuO e ZnO dispersas em soluções aquosas de goma xantana. Os autores observaram que o aumento da concentração de nanopartículas resultou em maior estabilidade da viscosidade em elevadas temperaturas e pressões, indicando a capacidade dos nanofluidos em mitigar os efeitos térmicos adversos sobre o comportamento reológico.

Gokdemir, Erkeköl e Dogan (2017) investigaram os efeitos da alta pressão em diferentes sistemas de fluidos de perfuração, incluindo fluidos à base de óleo, sintéticos e aquosos. Os resultados indicaram que, para fluidos considerados incompressíveis, como os fluidos à base de água, a pressão não exerceu influência significativa sobre o comportamento reológico quando a temperatura foi mantida constante. Entretanto, observou-se um leve aumento da viscosidade com o acréscimo da pressão. Os autores também destacaram que modelos reológicos convencionais não representam adequadamente os efeitos da pressão.

Estudos mais recentes, como o trabalho de Akpan, Enyi e Nasr (2020) analisaram a influência da adição de goma diutana em sistemas contendo goma xantana aplicados a fluidos de perfuração à base de água com bentonita. Esse estudo foi realizado tanto na ausência quanto na presença de NaCl. Os resultados demonstraram que a combinação de goma xantana e goma diutana resultou em maior estabilidade térmica. Os autores observaram viscosidades mais elevadas após envelhecimento a 25, 100 e 120°C por 16 h, quando comparadas às formulações contendo apenas goma xantana. Por outro lado, os fluidos formulados exclusivamente com goma xantana apresentaram perda significativa de viscosidade após envelhecimento a 120°C, evidenciando degradação térmica severa do polímero.

Em temperaturas elevadas, a estrutura da goma xantana sofre modificações significativas, resultando na redução da viscosidade do fluido. Isso acaba evidenciando sua limitada estabilidade térmica acima de aproximadamente 75°C, devido à deterioração da rede estrutural (QUITIAN-ARDILA *et al.*, 2024). Alguns autores associam essa queda de

viscosidade à transição conformacional do tipo hélice–novelo, que ocorre, em geral, entre 50 e 60°C, podendo variar conforme a formulação do fluido (QUITIAN-ARDILA *et al.*, 2024). Quitian-Ardila *et al.* (2024) discorrem que essa transição está relacionada à desorganização da estrutura molecular, levando a goma xantana a uma conformação mais desordenada, embora esse mecanismo ainda seja objeto de discussão na literatura.

Após o envelhecimento dos fluidos nas condições previamente definidas, torna-se possível avaliar suas propriedades reológicas e químicas, permitindo compreender o comportamento do fluido em situações representativas do fundo de poço e compará-lo às propriedades observadas antes do processo de envelhecimento.

2.5. SEDIMENTAÇÃO EM SUSPENSÕES

A sedimentação é uma operação unitária amplamente empregada em diversos setores industriais, caracterizada como um processo de separação sólido-líquido baseado na diferença de densidade entre as fases presentes na suspensão (CREMASCO, 2018). Sob a ação do campo gravitacional, as partículas sólidas tendem a se deslocar em direção ao fundo do sistema, enquanto a fase líquida permanece sobrenadante.

Do ponto de vista operacional, a sedimentação apresenta a vantagem de poder ser estudada por meio de ensaios simples em escala laboratorial, como o ensaio em proveta (teste de sedimentação em batelada). Esse procedimento permite acompanhar a evolução da interface sólido-líquido ao longo do tempo, identificar as diferentes regiões de sedimentação e fornecer parâmetros fundamentais para o dimensionamento de sedimentadores contínuos em escala industrial (CREMASCO, 2018; MATOS, 2016).

O principal objetivo da operação unitária de sedimentação é promover a clarificação e o espessamento de suspensões. Conforme Matos (2016), a sedimentação pode ser classificada em dois tipos: espessamento, no qual o produto de interesse é a fase sólida concentrada; e clarificação, em que o objetivo é a obtenção de um líquido com baixo teor de sólidos em suspensão.

Em 1952, Kynch propôs uma teoria alternativa para a sedimentação de partículas. A teoria foi fundamentada na equação da continuidade e na conservação de massa, sem a necessidade de detalhar explicitamente as forças individuais atuantes sobre cada partícula. Essa

abordagem representou um avanço conceitual importante, pois deslocou o foco da análise das forças microscópicas para a descrição macroscópica do comportamento coletivo da suspensão.

Segundo a teoria de Kynch, a velocidade de sedimentação em sistemas concentrados depende da concentração local de sólidos. A variação dessa velocidade pode ser determinada a partir da observação do movimento da interface superior da dispersão e da distribuição inicial das partículas. Durante o processo, forma-se uma fronteira bem definida entre a região clarificada e a zona de sedimentação em massa, caracterizando o fenômeno de sedimentação em zona. Essa formulação permitiu estabelecer uma relação direta entre concentração e fluxo de sólidos, constituindo base para a modelagem matemática de espessadores industriais.

Para a formulação de sua teoria, Kynch (1952) estabeleceu um conjunto de hipóteses simplificadoras, necessárias para viabilizar o tratamento matemático do fenômeno de sedimentação. De acordo com o autor, admite-se que:

- A sedimentação da dispersão das partículas pode ser considerada semelhante;
- A velocidade de qualquer partícula depende só da concentração local;
- A concentração representa o número das partículas por unidade de volume de dispersão;
- O fenômeno é unidimensional;
- Fluido incompressível;
- A concentração aumenta em direção ao fundo do recipiente;
- A velocidade de queda diminui com o aumento da concentração;
- A concentração das partículas é considerada constante em qualquer ponto da camada horizontal;

Essas hipóteses implicam que a sedimentação é governada apenas por variações locais de concentração. Assim, acaba desconsiderando efeitos inerciais, variações tridimensionais e interações complexas entre partículas. Portanto, o modelo concentra-se na descrição macroscópica do processo, assumindo que o comportamento coletivo pode ser representado por relações entre fluxo de sólidos e concentração.

Como resultado dessas premissas, Kynch (1952) desenvolveu um modelo capaz de descrever a propagação de “ondas” de igual concentração, que se deslocam com velocidade constante ao longo da coluna de sedimentação. Essas ondas partem da região inferior do

recipiente em direção à zona clarificada, permitindo a previsão do movimento das interfaces e da evolução do perfil de concentração ao longo do tempo.

Posteriormente, Shannon *et al.* (1963) fundamentaram seu estudo na teoria de Kynch (1952), mantendo como hipótese central que a velocidade de sedimentação relativa dos sólidos depende exclusivamente da concentração local. Essa suposição equivale a admitir que os efeitos de aceleração do fluido e das partículas são desprezíveis, sendo predominantes as forças associadas ao escoamento do fluido intersticial.

Além disso, o modelo proposto por Shannon *et al.* (1963) adotou as seguintes premissas adicionais: partículas de tamanho e densidade uniformes; efeitos de parede desprezíveis; e independência entre a velocidade de sedimentação dos sólidos e a velocidade do fluido da polpa. Essas simplificações permitiram a obtenção de soluções teóricas mais tratáveis e comparáveis com resultados experimentais.

Os resultados obtidos indicam que a hipótese de partículas idênticas é válida quando ocorre pouca ou nenhuma segregação, sendo a segregação caracterizada pela presença de uma interface fluido-polpa difusa. Além disso, o modelo desenvolvido apresentou boa concordância com as equações teóricas, especialmente para determinadas faixas de concentração entre 0,15 e 0,55 g/cm³, demonstrando aplicabilidade adequada dentro desses limites operacionais.

Já Fitch (1966) analisou criticamente diferentes abordagens teóricas aplicadas ao dimensionamento de sedimentadores, incluindo as propostas por Coe e Clevenger (1916) e por Kynch (1952). O autor destacou que tais teorias não contemplam adequadamente os efeitos da compressibilidade das partículas, assumindo comportamentos ideais que nem sempre representam sistemas reais.

Harris (1975) investigou a sedimentação em batelada de suspensões diluídas de fosfato, nas quais pequenas quantidades de partículas grossas foram adicionadas com o objetivo de acelerar o processo. Os resultados evidenciaram um comportamento complexo, caracterizado por curvas de sedimentação com formato de “S” invertido e ausência de um período bem definido de velocidade constante. Esse comportamento é típico de materiais compressíveis. Observou-se ainda a formação espontânea de pequenos aglomerados por floculação, mesmo na ausência de agentes flocculantes. Também, observou a presença de diferentes regiões ao longo da coluna, cada uma associada a um regime específico de sedimentação.

No mesmo período, Adorján (1975) demonstrou que, em sistemas com sedimentos compressíveis, os ensaios convencionais utilizados no projeto de sedimentadores não fornecem

informações suficientes para um dimensionamento confiável. Como consequência, a aplicação direta desses métodos pode resultar em estimativas pouco realistas de capacidade operacional. Tal fator evidencia que tais modelos apresentam validade limitada para materiais com comportamento compressível.

Posteriormente, Damasceno (1992) realizou um estudo abrangente sobre espessadores contínuos, avaliando criticamente diferentes metodologias de projeto e modelagem do processo de sedimentação. O autor propôs uma abordagem baseada na formulação de equações constitutivas para a tensão nos sólidos e para a permeabilidade do sedimento, permitindo uma descrição mais consistente do comportamento do sistema. Os resultados, validados por meio de simulações computacionais, indicaram que espessadores contínuos apresentam elevado tempo de resposta frente a variações nas condições operacionais. Além disso, verificou-se que a altura da camada de sedimento constitui um parâmetro determinante para o desempenho do equipamento.

França *et al.* (1999) propuseram uma abordagem metodológica para a estimativa de parâmetros de permeabilidade e pressão em sólidos, utilizando dados provenientes de simulações de sedimentação em regime em batelada. O modelo desenvolvido pelos autores incorporou a presença simultânea de duas regiões distintas, associadas às equações de balanço global de massa e às limitações impostas pelas alturas das colunas. A determinação dos parâmetros dessas equações foi realizada por meio do ajuste entre as previsões do modelo e as curvas experimentais de sedimentação obtidas em batelada. Quando os valores calculados foram confrontados com os resultados experimentais, observou-se uma concordância bastante satisfatória, indicando a boa capacidade preditiva do modelo.

Seguindo com o desenvolvimento nos estudos de sedimentação, Arouca (2003) estudou a operação de sedimentação em batelada. Para isso, utilizou suspensões a base de água de caulim. O estudo foi realizado monitorando a sedimentação das partículas através da técnica de atenuação de raios gama (TARG), obtendo a distribuição da concentração dos sedimentos. Finalizado o estudo, o autor obteve equações constitutivas a partir dos ensaios estáticos realizados, determinando a pressão nos sólidos e a permeabilidade do meio.

Arouca (2007) continuou desenvolvendo seus estudos para o fenômeno de sedimentação em batelada. Para esse estudo, o autor estudou soluções aquosas de diferentes materiais sólidos, utilizando novamente a TARG. O autor otimizou o modelo matemático desenvolvido por D'Áliva (1978) na abordagem do trabalho de Burguer e Concha (1988), introduzindo conceitos físicos ao modelo. Como resultados, as simulações realizadas pelo autor mostraram que o

modelo misto implementado (hiperbólico-parabólico) retratou adequadamente o fenômeno físico, sem a necessidade de se utilizar condições de salto nas fronteiras móveis. Também, observou-se que a qualidade da solução encontrada é melhor para sistemas pouco permeáveis.

Moreira (2014) investigou a sedimentação de partículas em fluidos pseudoplásticos utilizando a técnica de atenuação de raios gama para monitorar a variação da concentração de sólidos ao longo do tempo. Foram propostas equações constitutivas para a pressão nos sólidos e a permeabilidade do meio poroso, visando auxiliar na modelagem da filtração em condições estáticas. Os resultados mostraram que os efeitos de memória presentes nos fluidos pseudoplásticos influenciaram as taxas de sedimentação. O sedimento se formou mais rapidamente no início quando comparado a um fluido newtoniano de viscosidade aparente similar. Porém, a compactação final demandou um tempo maior no fluido não-newtoniano, evidenciando diferenças relevantes no comportamento entre os dois tipos de fluidos.

Fagundes (2019) investigou a sedimentação de partículas em fluidos de perfuração com diferentes graus de pseudoplasticidade e tixotropia. O estudo foi realizado utilizando a Técnica de Atenuação de Raios Gama para monitorar a concentração volumétrica de sólidos ao longo do tempo. A autora avaliou fluidos com variadas concentrações de carboximetil celulose e de hematita, observando como resultado que tanto a adição do polímero quanto o adensamento contribuíram para a manutenção das partículas em suspensão. Foi confirmada a hipótese de que a pressão nos sólidos depende apenas da concentração de partículas, e a autora propôs uma equação para a permeabilidade do sedimento. Os resultados indicaram que a concentração de CMC influenciou pouco a permeabilidade, sendo a acomodação final dos sólidos no sedimento o fator predominante para os valores encontrados.

De forma geral, a evolução desses estudos evidencia que a sedimentação de suspensões reais, especialmente aquelas com comportamento compressível e interações estruturais significativas, não pode ser plenamente descrita por modelos clássicos baseados apenas na concentração. Assim, a inclusão de parâmetros como tensão de escoamento, viscosidade aparente e índice de comportamento nos modelos de sedimentação permite uma representação mais realista do processo.

2.6. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

Baseia-se no uso da energia emitida na forma de radiação eletromagnética (CÉSAR, 2014) e consiste em um procedimento não destrutivo, amplamente empregado em diferentes aplicações, apresentando elevado grau de confiabilidade nos resultados obtidos (FAGUNDES, 2019).

A TARG fundamenta-se na medição da intensidade de um feixe de raios gama (γ), emitido por um radioisótopo e recebido por um sistema de detecção. A atenuação do feixe ao atravessar o meio analisado está diretamente relacionada às propriedades do material, o que permite a avaliação da variação da concentração volumétrica de sólidos.

Dessa forma, a técnica mostra-se particularmente adequada para experimentos envolvendo fluidos de perfuração e o estudo de seus processos de sedimentação (FAGUNDES, 2019).

A aplicação dessa técnica requer o uso de um radioisótopo associado a um sistema capaz de detectar os raios gama emitidos. Usualmente, utilizam-se como fontes radioativas o Amerício-241 e o Césio-137. Tais elementos possuem picos de maior energia correspondem a 60 e 660 keV, respectivamente.

Dessa forma, os raios gama provenientes do Césio-137 são aproximadamente onze vezes mais energéticos que os emitidos pelo Amerício-241. Além da energia por feixe de radiação, outro parâmetro fundamental é a atividade da fonte, ou seja, a quantidade de feixes emitidos por unidade de tempo (DAMASCENO, 1992; GARDNER; ELY-JR, 1967).

Para a aplicação da TARG, é necessária a utilização de um sistema de detecção de raios gama associado a um radioisótopo (FAGUNDES, 2019). O sistema de detecção da radiação é constituído, geralmente, por um cristal cintilador. Esse cristal tem a função de captar os raios gama e convertê-los em fótons de luz, fenômeno que ocorre em decorrência da excitação e posterior relaxamento dos elétrons nas camadas de valência (GARDNER; ELY-JR, 1967).

Autores como Arouca (2007), Moreira (2014), Fagundes (2019), utilizaram uma unidade de aplicação de raios gama para desenvolvimento de suas pesquisas, determinando assim a concentração volumétrica de sólidos em diferentes instantes e posições de monitoramento.

Esta pesquisa se inseriu em uma consistente trajetória de estudos sobre sedimentação de partículas em suspensões complexas desenvolvida no âmbito do grupo de pesquisa.

O trabalho pioneiro de Damasceno (1992) estabeleceu bases fundamentais para o grupo.

O autor propôs equações constitutivas para a tensão nos sólidos e a permeabilidade do sedimento em espessadores contínuos, evidenciando a relevância da camada de sedimento no desempenho desses equipamentos.

As investigações de Arouca (2003, 2007) consolidaram o uso da Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) como ferramenta para monitoramento da sedimentação em batelada, permitindo avanços na modelagem matemática do fenômeno, particularmente na descrição de sistemas com diferentes permeabilidades.

Moreira (2014) ampliou o escopo ao estudar a sedimentação em fluidos pseudoplásticos, identificando efeitos de memória que influenciaram as taxas de sedimentação e a compactação final do sedimento.

Fagundes (2019) aplicou a TARG para investigar a sedimentação de partículas em fluidos de perfuração tixotrópicos e pseudoplásticos, confirmando a dependência da pressão nos sólidos exclusivamente com a concentração de partículas.

Dando continuidade a essa linha de pesquisa, o presente trabalho avançou ao avaliar os efeitos do envelhecimento térmico sobre a sedimentação de sólidos e as propriedades reológicas de fluidos de perfuração à base de água, combinando a TARG com ensaios reológicos sistemáticos e investigando isoladamente a degradação térmica da goma xantana.

Dessa forma, esta dissertação não apenas se beneficiou do conhecimento acumulado pelo grupo, mas também contribuiu para consolidar a expertise da equipe na aplicação de técnicas não destrutivas e na modelagem do comportamento de sistemas particulados em condições operacionais severas, reforçando a importância das pesquisas em sedimentação realizadas na casa.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados na condução e análise dos experimentos. Foram estudados dois fluidos de perfuração à base de água, um sendo fornecido pela Petrobras, e outro produzido no LabSep. Esses fluidos foram submetidos a envelhecimento acelerado, com o objetivo de avaliar o efeito do envelhecimento sobre as propriedades do fluido de forma indireta.

O envelhecimento acelerado é um procedimento laboratorial que submete os fluidos de perfuração a condições controladas de tempo e temperatura, com o objetivo de simular, de forma acelerada, as alterações físico-químicas que ocorreriam em condições reais de poço (OLISE; EKAETTE; OKOLOGUME, 2017).

As amostras foram submetidas a diferentes condições de tempo e temperatura em estufa e, após o resfriamento até a temperatura ambiente, suas propriedades reológicas foram determinadas. Essa metodologia possibilitou avaliar a influência do histórico térmico no comportamento reológico dos fluidos de perfuração.

3.1. FLUIDOS AQUOSOS DE PERFURAÇÃO DA PETROBRAS

3.1.1. PREPARO DAS AMOSTRAS

Os fluidos avaliados corresponderam a sistemas à base de água. O fluido de perfuração recebi da Petrobras conteve carbonato como agente de peso com densidade aproximada de 10 ppg (*pounds per gallons*). O fluido obtido pela Petrobras tem o codinome de BRCARB10, que é a denominação utilizada para esse fluido ao longo deste trabalho.

A utilização de salmoura, em substituição à água doce, contribui para maior estabilidade térmica e química do sistema, especialmente sob condições severas de poço (REINOSO et al., 2018).

No presente trabalho, as amostras dos fluidos de perfuração foram submetidas ao envelhecimento térmico em estufa, nas seguintes condições:

- temperatura(s): 65°C;
- tempo(s) de envelhecimento: 0h, 16h, 32h e 48h;
- recipiente: provetas de 500 mL vedadas;
- condição: estática (sem agitação durante o envelhecimento).

Após o período de envelhecimento, as amostras foram removidas da estufa e resfriadas até a temperatura ambiente (25 °C) antes da realização das medições reológicas. O resfriamento foi realizado de forma natural, mantendo-se os fluidos sobre uma bancada até atingirem a temperatura ambiente. Durante esse processo, nenhum dispositivo de troca térmica forçada, como ar-condicionado, estava em funcionamento na sala onde os fluidos foram resfriados. Todas as amostras permaneceram sob as mesmas condições e pelo mesmo intervalo de tempo de resfriamento antes do início das medições reológicas.

O carbonato de cálcio tem uma gama de possibilidade de usos como em plásticos, borracha e fluidos de perfuração, sendo um importante insumo mundial (RIBEIRO, 2020). É um composto proveniente de produtos como a cal virgem, cal hidratada e carbonato de cálcio precipitado (GUIMARÃES, 1990). Segundo Nguyen *et al.* (2011), esse componente pode ser usado nos fluidos de perfuração como aditivo adensante. Adicionalmente, Neto (2020) destaca que ele também pode atuar como regulador de densidade, controlador de filtrado e modificador de propriedades reológicas.

Para o preparo das amostras, os fluidos foram inicialmente homogeneizados em um mixer rotativo da empresa IKA LABORTECHNIK, modelo RW20DZM.n, operando a 1000 rpm por aproximadamente 10 minutos. Essa etapa considerou-se fundamental para assegurar a representatividade da amostra, minimizando possíveis efeitos de sedimentação prévia de partículas sólidas ou formação de aglomerados poliméricos, que poderiam comprometer a reprodutibilidade dos resultados experimentais (THOMAS, 2001). A Figura 2 representa o mixer utilizado no trabalho.

Considerando que os fluidos são a base de água e a temperatura moderada utilizada no envelhecimento acelerado, havia risco de evaporação da fase contínua. Para que não houvesse perdas de massa e alterações na concentração dos componentes, as provetas foram vedadas com papel alumínio e fita adesiva. Durante o período máximo de 48 h, o sistema de vedação mostrou-se eficiente, não sendo observadas perdas significativas visíveis de fluido nas temperaturas avaliadas.

Figura 2: Mixer rotativo.



Fonte: Autor, 2026.

Concluída a preparação, iniciou-se o processo de envelhecimento térmico. As provetas foram posicionadas em estufa previamente estabilizada a 65°C, conforme recomenda a norma API (2023). Na estufa, os fluidos permaneceram por períodos predeterminados de 16 h, 32 h e 48 h, com o objetivo de avaliar a estabilidade térmica dos fluidos sob condições controladas de envelhecimento estático, conforme procedimento recomendado pela norma API (2023). Como a sugestão da norma é de avaliação de um tempo de 16h, realizou-se a extrapolação do tempo de envelhecimento, para assim entender o impacto na degradação dos fluidos quando expostos a um maior tempo de envelhecimento. A figura 3 mostra os fluidos depois de retirados da estufa, onde já é possível se observar a existência dos fungos no topo da proveta.

Figura 3: Fluidos envelhecidos em diferentes tempos.



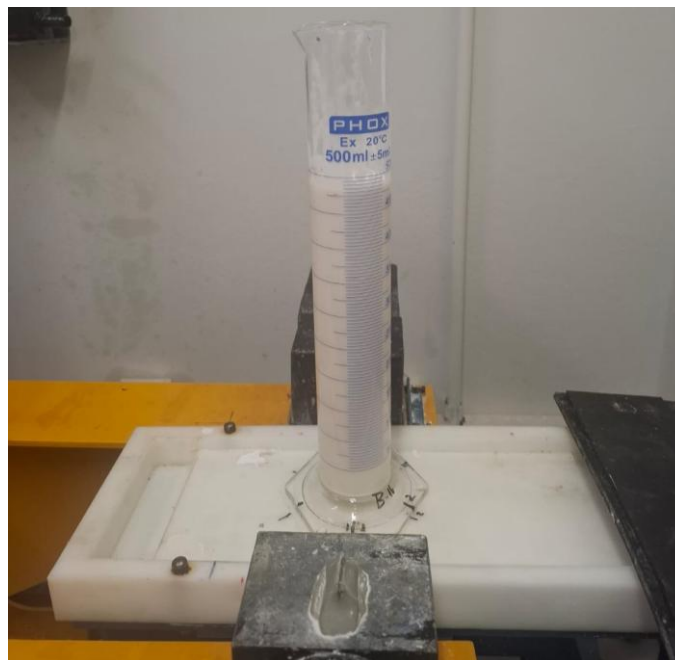
Fonte: Autor, 2026.

Após a homogeneização, cada fluido foi transferido para uma proveta padrão de 500 mL. Antes de cada ensaio experimental, as amostras foram novamente agitadas manualmente, a fim de restabelecer a uniformidade do sistema.

Após o envelhecimento, os fluidos foram resfriados de maneira natural, deixados no ambiente até atingir a temperatura ambiente (mínimo de 24h nessa condição) e submetidos à análise por meio da TARG.

Após o resfriamento natural submetido para todas as amostras avaliadas em diferentes condições de envelhecimento, as soluções foram agitadas manualmente antes da primeira leitura de cada amostra. A análise da concentração volumétrica foi realizada pela técnica de atenuação de raios gama para a avaliação desses fluidos por longos períodos de tempo. A figura 4 ilustra a amostra analisada no sistema da TARG.

Figura 4: Representação do sistema de leitura da concentração volumétrica via TARG do fluido BRCARB10.



Fonte: Autor, 2026.

3.1.2. TESTE DE ENVELHECIMENTO ACELERADO NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Fluidos de perfuração de poços de petróleo são formulados com aditivos que conferem comportamento pseudoplástico e tixotrópico. Esse comportamento favorece o carregamento de cascalhos quando estão sendo bombeados pelo espaço anular do poço, e a manutenção dos sólidos em suspensão em condições de repouso. Entretanto, o envelhecimento do fluido ao longo do tempo pode afetar essas propriedades, resultando em alterações estruturais e químicas que impactam diretamente seu desempenho operacional.

Com o objetivo de simular, em escala laboratorial, essa condição, foi realizado o teste de envelhecimento acelerado conforme práticas recomendadas pela API. De acordo com a norma *API Recommended Practice 13B-1* (2009), o teste de envelhecimento acelerado para fluidos de perfuração à base de água consiste na submissão da amostra a condições controladas de temperatura elevada, por período determinado.

O objetivo do ensaio foi avaliar a estabilidade térmica do fluido sob condições controladas de envelhecimento estático. Segundo a referida norma, o ensaio pode ser conduzido, em condições padrão de laboratório, a 65°C por 16 horas, utilizando forno rotativo (*roller oven*) ou em condições estáticas (API, 2009). Essa condição (65°C por 16h) foi adotada como referência por representar um envelhecimento térmico moderado, conforme preconizado pela norma. Trata-se de um procedimento padrão para avaliação da estabilidade térmica de fluidos de perfuração em condições controladas de laboratório, permitindo a comparação entre diferentes formulações. Embora não reproduza fielmente as condições de um poço real, o ensaio estático a 65°C é amplamente utilizado como referência para estudos de degradação moderada. A figura 5 representa o fluido preparado para realização do envelhecimento.

Figura 5: Fluido preparado para o envelhecimento.



Fonte: Autor, 2026.

Após o período de envelhecimento, as amostras foram resfriadas até a temperatura ambiente antes da realização das análises reológicas, físico-químicas e de controle de filtrado. Esse procedimento permitiu avaliar a estabilidade do sistema e identificar possíveis alterações em parâmetros como viscosidade, força gel, perda de filtrado e comportamento reológico, fornecendo subsídios para a previsão do desempenho do fluido em condições reais de operação. Dessa forma, o ensaio padronizado possibilita a avaliação da manutenção das propriedades reológicas após exposição térmica, estabelecendo uma condição de referência para comparação entre diferentes tempos de envelhecimento.

O teste de envelhecimento acelerado foi conduzido em estufa previamente aquecida a 65°C, na qual as amostras permaneceram por períodos predeterminados de 0, 16, 32 e 48 horas. A aplicação de 65°C de temperatura foi conforme o procedimento da norma apresentado anteriormente. Desejou-se aplicar outros tempos de envelhecimento para entender o comportamento do fluido quando exposto por mais tempo na temperatura padrão de análise.

Esse procedimento teve como objetivo possibilitar uma melhor compreensão da estabilidade dos fluidos de perfuração, bem como dos efeitos da exposição prolongada à temperatura sobre suas propriedades. Após o período de aquecimento, as amostras foram retiradas da estufa e resfriadas naturalmente até atingirem a temperatura ambiente. A Figura 6 apresenta a estufa utilizada neste trabalho.

Figura 6: Estufa laboratorial.



Fonte: Autor, 2026.

3.1.3. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA

3.1.3.1. DENSIDADE

A determinação da densidade foi realizada por meio de picnometria, definida como uma técnica baseada na medição precisa da massa correspondente a um volume conhecido de fluido. Para os ensaios, foi utilizado picnômetro com volume nominal de 50 mL. Inicialmente, determinou-se a massa do picnômetro vazio, limpo e completamente seco, utilizando balança analítica de alta precisão.

Em seguida, o picnômetro foi preenchido com a amostra, assegurando o completo preenchimento do volume interno e evitando a formação de bolhas de ar, que poderiam introduzir erros sistemáticos na medição. Após o preenchimento, o conjunto foi novamente pesado, sendo a massa do fluido obtida pela diferença entre a massa do picnômetro cheio e a massa do picnômetro vazio.

A densidade foi então calculada pela razão entre a massa da amostra e o volume nominal do picnômetro, considerando a temperatura do ensaio a temperatura ambiente, uma vez que tanto o volume quanto a densidade são dependentes da temperatura. Para cada amostra, foram realizadas três repetições independentes, sendo reportado o valor médio obtido.

A determinação da densidade por picnometria é amplamente utilizada em análises laboratoriais que demandam elevado controle das propriedades físicas dos fluidos, em virtude da precisão e da confiabilidade do método (PETROBRAS, 2011).

3.1.3.2. VOLUME DE FILTRADO (HP)

O volume de filtrado foi medido a partir de um filtro HPHT (*High Pressure High Temperature*) da marca OFITE, modelo de 500 mL de fluido. Esse equipamento é destinado à simulação de condições severas de pressão e temperatura, similares às encontradas em operações de perfuração (PETROBRAS, 2011).

Inicialmente, um lado do filtro é fechado e em seguida a amostra foi adicionada ao compartimento interno da célula, respeitando o volume de 50 mL. Em seguida, o papel filtro foi posicionado adequadamente na base da célula de filtração, garantindo seu correto assentamento e vedação. A célula foi então devidamente vedada e conectada ao sistema de aplicação de pressão por meio de gás comprimido.

Durante o teste o fluido foi forçado a atravessar o meio filtrante sob pressão controlada, enquanto o volume de filtrado coletado foi medido ao longo do tempo, em um intervalo de 30 minutos a 200 psi. Ao final do ensaio, registrou-se o volume total de filtrado obtido, parâmetro utilizado para avaliar a capacidade do fluido em controlar perdas por filtração sob condições de alta pressão e temperatura.

3.1.3.3. CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS (RETORTA)

A concentração volumétrica de sólidos foi determinada pelo método da retorta, técnica fundamentada na destilação de uma alíquota conhecida do fluido de perfuração, permitindo a separação das fases líquidas e a quantificação do resíduo sólido remanescente (PETROBRAS, 2011).

O equipamento possui um compartimento de 10 cm³ de capacidade, uma câmara de aquecimento, um forno e um condensador. Esse compartimento é conectado com a câmara de aquecimento existente para a destilação. Dessa maneira, o recipiente foi preenchido com o fluido de perfuração, acoplado na câmara de aquecimento (que é preenchida com esponja de aço), conectando os componentes para a realização da destilação. O destilado é coletado em uma proveta, e o sólido presente no fluido fica retido no copo do equipamento (PETROBRAS, 2011).

Inicialmente, o recipiente da retorta foi limpo, seco e pesado vazio para registro da massa inicial. Em seguida, adicionou-se um volume conhecido da amostra, pesando novamente a nova amostra para determinação da massa total. Uma pequena quantidade de palha de aço foi adicionada na câmara de aquecimento com o objetivo de evitar projeções durante o aquecimento e promover distribuição mais uniforme do calor. Após o término do aquecimento e resfriamento do sistema, o copo contendo o resíduo sólido foi novamente pesado, possibilitando a determinação da massa de sólidos remanescentes. A partir das leituras

volumétricas e das massas obtidas, calcularam-se as frações volumétricas das fases líquidas e o teor de sólidos presentes na amostra.

O teor de água presente no fluido com base de salmoura foi calculado, e a fórmula corrigida para a quantidade de água é apresentada na Equação 9 (PETROBRAS, 2011):

$$\%H_2O_{\text{corrigida}} = \% H_2O_{\text{lida}} \left(1 + 7,15 \cdot 10^{-8} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \text{NaCl}\right)\right)^{1,14} \quad (9)$$

em que $\%H_2O_{\text{corrigida}}$ representa o percentual real de água no fluido de perfuração, após correção pela salinidade, H_2O_{lida} indica o percentual de água lida diretamente na proveta; e *ppm (NaCl)* indica a concentração de cloreto de sódio na fase aquosa do fluido em partes por milhão.

De posse do tanto de água presente no fluido, obtém-se o valor da concentração volumétrica de sólidos fazendo a subtração de 100 pelo valor obtido de água (como é um fluido aquoso, não tem a presença de óleo).

3.1.3.4. TEOR DE SAL (TITULAÇÃO)

A determinação do teor de sal foi realizada por titulometria pelo método de Mohr, baseado na precipitação de íons cloreto presentes na amostra por meio da adição de solução padrão de nitrato de prata (AgNO_3) (PETROBRAS, 2011). Inicialmente, um volume de 1 mL de filtrado foi transferido para um Erlenmeyer. Em seguida, adicionou-se 40 mL de água destilada e 5 gotas de fenolftaleína. Um grama de CaCO_3 foi adicionado na solução, que depois é neutralizada por ácido nítrico, gota a gota. Por fim, 5 gotas de solução indicadora de cromato de potássio (K_2CrO_4) são adicionadas na solução pronta para titulação. Durante a titulação, o nitrato de prata reage formando cromato de prata (Ag_2CrO_4), de coloração avermelhada, indicando o ponto final da titulação. O teor de sal foi então calculado com base no volume de titulante consumido, na sua concentração e no volume da amostra analisada (PETROBRAS, 2011). Sendo assim, o teor mássico de NaCl em solução é dado pela Equação 10:

$$\text{Salindade em ppm} = \frac{\left(\text{salindade em } \frac{\text{mg}}{\text{L}}\right)}{\text{densidade da solução em g/mL}} \quad (10)$$

3.1.4. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

3.1.4.1. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O comportamento reológico das amostras foi avaliado por meio de ensaios de varredura de taxa de cisalhamento, permitindo determinar a relação entre tensão cisalhante e taxa de deformação. As análises reológicas foram realizadas em um reômetro Brookfield R/S Plus equipado com *spindle* CC40, operando em rotações de 0,1 até 1200 s⁻¹. Essas análises tiveram como objetivo caracterizar o comportamento pseudoplástico, tixotrópico e a histerese das amostras.

Para a obtenção das curvas reológicas, as amostras foram submetidas a uma rampa crescente de rotação, variando de 1 a 475 rpm. A partir dos dados de tensão de cisalhamento (τ) em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$), foi possível caracterizar o comportamento reológico dos fluidos.

A dependência com o tempo, também definida como tixotropia, foi avaliada por meio do seguinte procedimento: inicialmente, o fluido foi submetido a um pré-cisalhamento a 475 RPM por 90 segundos com o objetivo de padronizar o cisalhamento da amostra. Em seguida, a amostra permaneceu em repouso por diferentes tempos (10 segundos, 10 minutos e 30 minutos). Após cada período de repouso aplicou-se uma taxa de cisalhamento constante e baixa de 5,13 s⁻¹, registrando-se a resposta reológica do fluido. A comparação das respostas obtidas após os diferentes tempos de repouso permitiu avaliar a recuperação estrutural do fluido e, conseqüentemente, seu comportamento tixotrópico.

Para avaliar o comportamento pseudoplástico das soluções, foram medidos os valores de tensão de cisalhamento (Pa) em diferentes taxas de deformação, obtidas a partir da variação da rotação do *spindle*. A partir desses dados experimentais, foram construídos os reogramas que descrevem a relação entre tensão e taxa de cisalhamento, e permitem ajustar os resultados ao modelo escolhido. Com esse ajuste, foram determinados o índice de consistência (K) e o índice de comportamento (n), parâmetros essenciais para compreender como a temperatura e o tempo de envelhecimento influenciam a resposta reológica das soluções poliméricas.

Assim, os dados obtidos possibilitam a construção do reograma do sistema. Além disso, fornecem base consistente para a análise quantitativa do comportamento reológico das

amostras, permitindo interpretar de forma objetiva as alterações estruturais decorrentes das condições de ensaio.

3.1.5. ENSAIOS DE SEDIMENTAÇÃO EM BATELADA

Os ensaios de sedimentação em batelada foram realizados com o objetivo de comparar a distribuição espacial da concentração volumétrica de sólidos, em fluidos de perfuração de base aquosa ao longo do tempo nas diferentes condições de envelhecimento realizadas. Para isso, foi utilizada a TARG.

3.1.6. TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

3.1.6.1. UNIDADE EXPERIMENTAL

A TARG baseia-se na atenuação de um feixe colimado de radiação gama ao atravessar um meio físico, sendo particularmente adequada para a determinação da concentração volumétrica de sólidos em suspensões sólido-líquido. A atenuação do feixe ocorre em função das propriedades físicas do meio atravessado e do radioisótopo utilizado, permitindo relacionar a intensidade da radiação detectada à concentração volumétrica de partículas presentes.

O sistema experimental utilizado foi composto por uma fonte selada de Amerício-241 (^{241}Am) e por um sistema de detecção acoplado a uma estrutura metálica móvel, que permite o ajuste da posição vertical do feixe de radiação ao longo da altura do recipiente de ensaio. A unidade é apresentada na Figura 7, possibilitando medições pontuais em diferentes posições da coluna de fluido.

De acordo com as especificações do fabricante Amersham (atualmente GE Healthcare), a fonte radioativa apresentava atividade nominal de 100 mCi em 22 de setembro de 1995. O radioisótopo amerício-241 possui tempo de meia-vida de aproximadamente 432 anos, o que torna desnecessária a necessidade de correções associadas ao decaimento radioativo durante o período de realização dos experimentos. Além disso, conforme reportado por Hamacher (1978), a radiação gama emitida por esse radioisótopo apresenta energia intermediária, da ordem de 60

keV, característica adequada para aplicações em técnicas de atenuação de raios gama voltadas à análise de suspensões sólido-líquido.

Figura 7: Unidade de aplicação da técnica de atenuação de raios gama (TARG).



Fonte: Autor, 2026.

O sistema de colimação é constituído por dois blocos de chumbo, cada um com arestas de 100 mm e um orifício central de aproximadamente 5 mm de diâmetro alinhados entre si. Em um dos blocos encontra-se alojada a fonte radioativa enquanto no outro está acoplado o sistema detector de radiação. O chumbo tem a função de garantir o adequado direcionamento do feixe colimado, além de proteger o operador contra exposições indesejadas à radiação.

O sistema detector é composto por um cristal cintilador de iodeto de sódio ativado com tálio (NaI(Tl)), responsável pela emissão de cintilações luminosas quando os fótons gama são absorvidos. Esse cristal está acoplado a um módulo DigiBase, que integra uma válvula fotomultiplicadora e um pré-amplificador, promovendo a conversão dos pulsos luminosos em sinais elétricos. Esses sinais são processados e registrados por meio do *software* Maestro, que fornece os valores de intensidade de radiação em número de pulsos detectados.

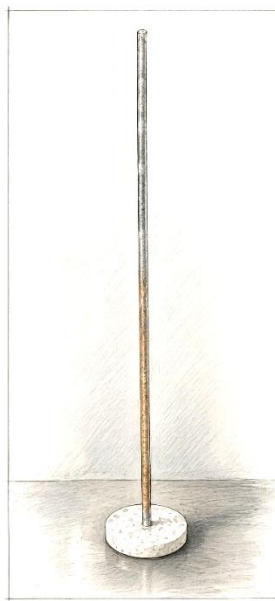
Antes da realização dos ensaios, foi verificada a uniformidade geométrica das provetas utilizadas, a fim de evitar interferências nos resultados de atenuação da radiação. Para isso, foram realizadas leituras de intensidade ao longo da altura da vidraria em incrementos de 0,5

cm, utilizando a própria técnica TARG para assegurar a ausência de variações geométricas significativas.

3.1.6.2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE LEITURA

Após o resfriamento, cada fluido foi individualmente posicionado na unidade experimental de aplicação da TARG, sendo realizada uma homogeneização manual adicional imediatamente antes do início das leituras. Esse processo manual foi realizado para todas as amostras por um período de 2 minutos seguidos, usando uma haste manual (Figura 8).

Figura 8: Mixer manual



Fonte: Autor, 2026.

Foram estabelecidas posições fixas ao longo da altura da proveta para a aquisição dos valores de intensidade de radiação, medidas a partir da base do recipiente, correspondentes às alturas de 2,5; 4; 6; 10; 14; 18; 20 e 22 cm. Em cada posição, foram realizadas seis leituras consecutivas, com tempo de contagem de 20 s por leitura. Esse procedimento foi aplicado a todas as suspensões submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado, bem como a um fluido mantido à temperatura ambiente, utilizado como fluido de referência para fins de comparação.

3.1.6.3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA O CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS

A determinação da concentração volumétrica de sólidos baseia-se na equação de Lambert. A equação descreve a variação da intensidade de um feixe monoenergético colimado de radiação gama de energia E , ao atravessar um meio físico, sendo expressa pela Equação 11:

$$I(E) = I_0 \exp(-\sigma(E)\rho y) \quad (11)$$

onde que I_0 representa a intensidade do feixe antes da passagem pelo meio físico, I a intensidade após a passagem pelo meio, $\sigma(E)$ o coeficiente de atenuação mássico do meio para a energia considerada, ρ a densidade do meio e y a espessura atravessada pelo feixe de radiação.

Gardner e Ely-Jr (1967) adaptaram a equação de Lambert para o caso particular em que o meio atravessado pela radiação é uma suspensão sólido-líquido, adotando como estado de referência um fluido isento de sólidos suspensos. Nessa condição, tem-se a Equação 12:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (12)$$

onde ε_s é a concentração volumétrica de sólidos e β é um coeficiente característico do sistema, obtido a partir de uma curva de calibração específica para cada suspensão analisada.

3.1.6.4. TRATAMENTO DOS RESULTADOS DE INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

A partir dos resultados obtidos da intensidade de radiação por meio da técnica de atenuação de raios gama, procedeu-se o tratamento dos resultados com o objetivo de determinar a concentração volumétrica de sólidos ao longo da coluna de fluido.

Os valores de intensidade fornecidos pelo *software* Maestro correspondem ao número total de pulsos registrados durante o intervalo de contagem adotado em cada leitura. Como todas as medições foram realizadas com tempo de contagem de 20 s, os valores de intensidade bruta foram inicialmente normalizados em função do tempo de aquisição, de modo a obter a intensidade de radiação não atenuada por segundo.

Em seguida, os valores de intensidade de radiação (I) foram corrigidos em função do tempo de resolução do sistema de detecção, também denominado tempo morto (τ').

3.1.6.5. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA

A determinação do tempo de resolução do sistema foi realizada segundo a metodologia proposta por Damasceno (1992), utilizando blocos de acrílico de diferentes espessuras como atenuadores da radiação.

Inicialmente, foi realizada a leitura da intensidade do sistema sem a presença de qualquer obstáculo entre a fonte e o detector, obtendo-se a intensidade total de pulsos detectados. Em seguida, foram realizadas leituras com dois blocos de acrílico posicionados simultaneamente entre a fonte e o detector.

A intensidade associada à atenuação conjunta dos blocos, denominada I_{AB} , foi obtida pela diferença entre a intensidade medida sem obstáculos e a intensidade detectada com ambos os blocos de acrílico interpostos no feixe de radiação.

Posteriormente, leituras adicionais foram realizadas utilizando individualmente cada um dos blocos de acrílico. De forma análoga, as intensidades I_A e I_B foram determinadas pela diferença entre a intensidade sem atenuação e as intensidades medidas com os blocos A e B isoladamente, respectivamente.

Por fim, foi determinada a intensidade de fundo (*background*), definida como I_G . Esse parâmetro corresponde à radiação detectada com a fonte devidamente blindada por chumbo, representando contribuições provenientes de outras fontes radioativas e do ruído intrínseco do sistema de detecção.

A partir dessas medições, o tempo morto do sistema (τ') foi determinado pela Equação 13 (GARDNEY; ELY-JR, 1967):

$$\tau' = \frac{I_{AB} - I_A - I_B + I_G}{I_A^2 + I_B^2 - I_{AB}^2} \quad (13)$$

3.1.6.6. CORREÇÃO DA INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

De posse do valor do tempo de resolução do sistema, os valores de intensidade de radiação não atenuada (I) foram corrigidos para obtenção da intensidade efetiva (R), conforme a Equação 14:

$$R = \frac{I}{(1 - \tau'I)} \quad (14)$$

Essa correção foi aplicada a todas as leituras realizadas ao longo da altura da proveta e ao longo do tempo de sedimentação.

3.1.6.7. DETERMINAÇÃO DE R_0 E DO COEFICIENTE β

A determinação da concentração volumétrica de sólidos (ε_s) por meio da técnica de atenuação de raios gama baseia-se na equação de Lambert. Tal equação foi adaptada para suspensões sólido-líquido, na qual os valores de atenuação dos feixes de radiação corrigidos pelo tempo de resolução do sistema estão diretamente relacionados à concentração volumétrica de partículas presentes no meio. Essa relação está expressa na Equação 15 (GARDNEY; ELY-JR, 1967):

$$\ln\left(\frac{R_0}{R}\right) = \beta \varepsilon_s \quad (15)$$

em que R_0 corresponde à intensidade medida na região de líquido clarificado, R à intensidade local corrigida e β ao coeficiente de atenuação efetivo do sistema, dependente das características do fluido, das partículas e do radioisótopo.

A Equação 16 é linear em ε_s se β for constante. Nesse caso, β corresponde ao coeficiente angular da reta. Sua determinação, portanto, requer a definição prévia de R_0 e de pelo menos um segundo ponto experimental de concentração volumétrica conhecida para calcular a inclinação. Caso a relação não seja linear, o coeficiente β pode não ser constante e sua obtenção exigiria um ajuste mais elaborado.

A partir dessa equação, observa-se que o coeficiente β corresponde ao coeficiente angular. Assim, sua determinação requer a definição prévia de R_0 e de um segundo ponto experimental correspondente a uma concentração volumétrica conhecida.

A intensidade de referência R_0 foi definida como a intensidade medida na região de líquido clarificado, caracterizada pela menor atenuação do feixe de radiação gama. Para cada fluido avaliado, R_0 foi determinado após a formação dessa região, sendo adotado como o maior valor de intensidade corrigida observado ao longo do experimento.

O coeficiente β foi determinado por meio de uma curva de calibração construída para cada condição experimental. Para a construção dessa curva, foram considerados dois pontos:

- (i) o ponto correspondente ao fluido isento de sólidos, para o qual $\varepsilon_s = 0$ e $\ln\left(\frac{R_0}{R_0}\right) = 0$; e
- (ii) o ponto correspondente ao fluido homogeneizado, com concentração volumétrica inicial de sólidos ε_s , para o qual foi calculado o valor de $\ln\left(\frac{R_0}{R_i}\right)$.

A intensidade associada a esse ponto, R_i , foi obtida pela média dos valores de intensidade corrigida medidos imediatamente após a homogeneização. A partir desses dois pontos, o coeficiente β foi calculado como a inclinação da reta definida pela equação de Lambert linearizada. O valor obtido foi posteriormente utilizado no cálculo da concentração volumétrica de sólidos ao longo da altura da proveta e do tempo de sedimentação.

3.2. SOLUÇÕES AQUOSAS COM GOMA XANTANA

3.2.1. PREPARO DAS SOLUÇÕES

As soluções poliméricas foram preparadas utilizando goma xantana (GX) como viscosificante, fornecida pela marca Deosen (lote 250147), e água destilada como meio dispersante.

Foram preparadas soluções aquosas de goma xantana em duas concentrações 0,2% e 0,4% (m/m), já que a goma xantana se torna muito viscosa já em baixas concentrações, com o

objetivo de avaliar o efeito da concentração polimérica sobre o comportamento reológico após o envelhecimento térmico.

Para a solução a 0,2% (m/m), foram pesados 2 g de goma xantana e dissolvidos em 1 L de água destilada. Para a solução a 0,4% (m/m), utilizou-se 4 g de goma xantana para o mesmo volume de solvente (1 L). Devido à tendência de rápida aglomeração do polímero, a adição da goma xantana foi realizada de forma gradual sob agitação mecânica contínua utilizando um mixer rotativo (Figura 2). Esse procedimento foi adotado para garantir a completa dispersão do polímero.

Após o preparo, as soluções permaneceram em repouso por 24 horas para garantir a completa hidratação do polímero antes do início dos ensaios de envelhecimento térmico. Esse procedimento segue a recomendação de Bicalho (2015) e Melo *et al.* (2013), que indicam aguardar um período de hidratação para que a interação entre o polímero e a água ocorra de forma completa. Durante esse intervalo, as propriedades reológicas do sistema ainda se encontram em evolução, até que seja atingido um estado de hidratação plena (FAGUNDES, 2019).

Para minimizar perdas por evaporação durante o envelhecimento térmico, o béquer foi vedado com papel alumínio e fita adesiva. A partir disso, as amostras preparadas foram encaminhadas para uma estufa laboratorial da marca QUIMIS pré-aquecida na temperatura objetivo. Sendo assim, para cada amostra envelhecida, pré-aqueceu a estufa por 2h (50°C, 75°C e 85°C) antes de adentrar o fluido na mesma.

Com a temperatura estabilizada, o fluido permaneceu estático em aquecimento por 24h, sendo esse o processo de envelhecimento térmico. Após o tempo determinado, os fluidos foram retirados da estufa e deixados para resfriar em temperatura ambiente por um tempo mínimo de 5 horas, garantindo que as amostras estivessem todas em temperatura ambiente.

As soluções de goma xantana tiveram suas propriedades reológicas avaliadas ao longo do tempo por 4 semanas. Para cada amostra coletada, foram feitas leituras uma vez na semana para obtenção de uma curva de pontos do polímero. O objetivo dessa ação era observar qual foi o comportamento afetado pelo envelhecimento ao longo do tempo. Além disso, para cada condição estudada, as amostras foram preparadas em triplicata, ou seja, para a amostra de 50°C tiveram três repetições e assim para todas as outras amostras avaliadas.

A goma xantana é um biopolímero de grande relevância na perfuração de poços de petróleo contribuindo, entre outros aspectos, para a remoção eficiente de cascalhos e rejeitos

(KANG; PETTITT, 1993). Devido às suas propriedades viscosificantes, a goma xantana é amplamente utilizada em fluidos de perfuração à base de água, promovendo aumento da viscosidade e controle da perda de filtrado (VIANA, 2021). Outro fator importante sobre a goma xantana é que influencia parâmetros reológicos como viscosidade aparente e propriedades viscoelásticas (BORGES; VENDRUSCOLO, 2008).

Concluído o período de hidratação, as soluções foram preparadas para o envelhecimento térmico. Para cada ensaio, 100 mL da solução foram vertidos em um béquer, mantendo-se o mesmo volume para todas as amostras de envelhecimento.

3.2.2. TESTE DE ENVELHECIMENTO ACELERADO

Após o período de hidratação, as soluções foram fracionadas em béqueres devidamente identificados, correspondentes às diferentes condições experimentais. Os recipientes foram selados com papel alumínio e fita adesiva, em quantidade suficiente para evitar a evaporação de água durante o aquecimento, garantindo a conservação da massa do sistema. A Figura 9 apresenta a solução de goma xantana envelhecida.

As amostras foram submetidas a envelhecimento térmico em estufa laboratorial (Figura 5), sob temperatura constante, considerando quatro condições de temperatura:

- temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$);
- 50°C ;
- 75°C ;
- 85°C .

Figura 9: Solução de goma xantana envelhecida.



Fonte: Autor, 2026.

O tempo de envelhecimento térmico foi de 24 horas, devido ao de testes preliminares em 16h, que é o tempo recomendado pela API, se mostrarem com resultados inconsistentes de leitura no viscosímetro. Para cada combinação de concentração, temperatura e tempo de envelhecimento foram realizadas triplicatas.

As medições foram realizadas em uma faixa de taxa de deformação entre 10 e 175 s⁻¹, limitada pelo viscosímetro Brookfield utilizado. Conforme especificado pelo fabricante, o equipamento fornece respostas confiáveis quando o torque se encontra entre 10% e 100%, condição atendida por todas as amostras analisadas, garantindo a precisão dos resultados experimentais.

3.2.3. CARACTERIZAÇÃO REOLÓGICA

3.2.3.1. EQUIPAMENTO E CONDIÇÕES DE MEDIÇÃO

As análises reológicas foram realizadas em um viscosímetro Brookfield DV2T (modelo LV), equipado com *spindle* 18, operando em rotações de até 200 rpm, com o objetivo de caracterizar o comportamento pseudoplástico, tixotrópico e de histerese das amostras.

3.2.3.2. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PSEUDOPLÁSTICO

Para analisar o comportamento pseudoplástico das soluções, foram obtidos valores de tensão de cisalhamento (Pa) e viscosidade aparente (Pa·s) em diferentes taxas de deformação, variando a rotação do spindle. Com esses dados experimentais, foram construídos os reogramas, que permitem determinar os índices de consistência e de comportamento do modelo de Hirschel-Bulkley (Equação 6), parâmetros fundamentais para avaliar a influência da temperatura e do tempo de envelhecimento na reologia das soluções poliméricas.

O objetivo do ensaio foi traçar a curva de pseudoplasticidade a partir dos valores de tensão de cisalhamento obtidos para diferentes taxas de deformação. O procedimento adotado consistiu em submeter o sistema a ciclos de repouso e cisalhamento controlado: inicialmente a amostra permaneceu em repouso por 30 segundos (0 RPM), seguida da aplicação de uma taxa

de cisalhamento específica por 1 minuto e 30 segundos, com registro dos valores de tensão a cada 10 segundos. Após esse período, a amostra retornou a um repouso de 30 segundos antes da aplicação da próxima taxa de cisalhamento.

As taxas de cisalhamento avaliadas foram 10, 25, 40, 55, 70, 85, 100, 115, 130, 145, 160 e 175 s⁻¹. Por exemplo, a amostra repousou por 30 segundos, seguida da aplicação da taxa de 10 s⁻¹ por 1 minuto e 30 segundos, com registro dos valores de tensão a cada 10 segundos. Em seguida, ocorreu novo período de repouso de 30 segundos antes de se aplicar a taxa de 25 s⁻¹, repetindo-se o ciclo até a última taxa de 175 s⁻¹.

Dessa forma, todos os resultados necessários para construir a curva de pseudoplasticidade do sistema foram obtidos, fornecendo a base para a análise quantitativa do comportamento reológico das soluções poliméricas.

A curva de pseudoplasticidade foi construída a partir da relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento aplicada, utilizando-se para isso as equações de Power-Law ou de Herschel-Bulkley. No presente trabalho, utilizou-se da equação de Herschel-Bulkley ($\tau = \tau_0 + K\dot{\gamma}$) para descrever o comportamento reológico do sistema, por ele incorporar a tensão de escoamento (τ_0), um parâmetro relevante para fluidos que exibem comportamento de corpo de Bingham.

Os ajustes iniciais foram realizados utilizando um software de análise de dados, empregando a função pré-definida correspondente à forma da Equação de Herschel-Bulkley. No entanto, essas tentativas resultaram em valores do índice de comportamento ($n < 0$) e dificuldades de convergência numérica e elevada incerteza associada aos parâmetros estimados, especialmente para τ_0 e K .

Para contornar essa limitação, optou-se por reescrever o modelo em termos da viscosidade aparente (η), definida como a razão entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, conforme Equação 4:

$$\eta = \tau \dot{\gamma} \quad (4)$$

substituindo as equações, obtém-se a expressão da Equação 16 para a viscosidade aparente em função da taxa de cisalhamento:

$$\eta = \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} + K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (16)$$

Essa modificação consistiu em dividir todos os parâmetros da equação pela taxa de cisalhamento aplicada. Essa formulação permitiu analisar a evolução da viscosidade aparente ao longo da aplicação da taxa de cisalhamento. O ajuste da Equação 16 foi realizado por meio de regressão não linear, utilizando o algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimização da soma dos quadrados dos resíduos (método dos mínimos quadrados), implementado em software de análise de dados.

Durante o procedimento de ajuste, foram definidos limites inferiores e superiores para os parâmetros, impondo especificamente a restrição $0 < n < 1$ para garantir que o índice de comportamento se mantivesse dentro da faixa fisicamente consistente para fluidos pseudoplásticos. Essa restrição auxilia o algoritmo de regressão a convergir para uma solução com significado físico, evitando valores espúrios ou numericamente instáveis.

Os chutes iniciais para os parâmetros foram estimados a partir da inspeção gráfica da curva $\eta\dot{\gamma}$: o valor assintótico da viscosidade em altas taxas de cisalhamento foi utilizado como estimativa inicial para K , a tensão de escoamento τ_0 foi estimada a partir do comportamento da viscosidade em baixas taxas, e n teve como chute inicial 0,5, valor médio da faixa pseudoplástica. O critério de convergência adotado foi baseado na redução relativa da soma dos quadrados dos resíduos, com tolerância padrão da implementação do algoritmo.

Essa abordagem permitiu analisar a evolução da viscosidade aparente com a taxa de cisalhamento e obter os parâmetros reológicos τ_0 , K e n com maior estabilidade numérica e menor incerteza, possibilitando a comparação dos efeitos do envelhecimento térmico sobre o comportamento reológico da goma xantana.

Portanto, o ajuste matemático aplicado neste estudo visou otimizar a análise e melhorar a interpretação dos resultados para a goma xantana, preservando a validade da análise e os objetivos do trabalho.

3.2.3.3. AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO TIXOTRÓPICO

A tixotropia foi avaliada por meio da determinação da força gel e da área de histerese. Esses parâmetros permitiram analisar, respectivamente, a capacidade de estruturação do fluido em repouso e o grau de quebra e recuperação estrutural sob cisalhamento.

A determinação da força gel foi realizada em três etapas sequenciais. Inicialmente, a amostra foi submetida à rotação máxima do equipamento (200 RPM), com o objetivo de promover a completa desestruturação da rede interna do fluido. Na sequência, o sistema permaneceu em repouso por um intervalo previamente estabelecido, permitindo sua reorganização estrutural. Após esse período, aplicou-se a menor taxa de cisalhamento disponível (5 RPM), registrando-se o valor máximo de tensão de cisalhamento atingido nesse instante, correspondente à força gel.

Para investigar a influência do tempo na recuperação estrutural, foram considerados três intervalos de repouso: 10 s, 10 min e 30 min. Após cada período de repouso, foi registrada a máxima tensão de cisalhamento, permitindo a construção da curva tixotrópica e a análise da capacidade de recuperação estrutural.

3.2.3.4. AVALIAÇÃO DA HISTERESE

A histerese foi avaliada por meio de ensaios com variação progressiva e regressiva da taxa de cisalhamento. Para isso, iniciou-se o procedimento deixando o sistema em repouso 2 minutos, seguido da bateria de taxas determinadas para montar a curva de interesse. Cada taxa é avaliada por um minuto direto, uma seguida da outra, obtendo-se novamente um ponto a cada 10 segundos, resultando em 10 pontos para cada taxa. As taxas avaliadas consistiram em: subir a rampa de taxa cisalhante de 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 RPM, uma leitura após a outra, sem repouso, seguido da descida da rampa, lendo a tensão cisalhante para as taxas de 50, 45, 40, 35, 30, 25, 20, 15, 10. O fluxograma desse sistema é apresentado na Figura 10.

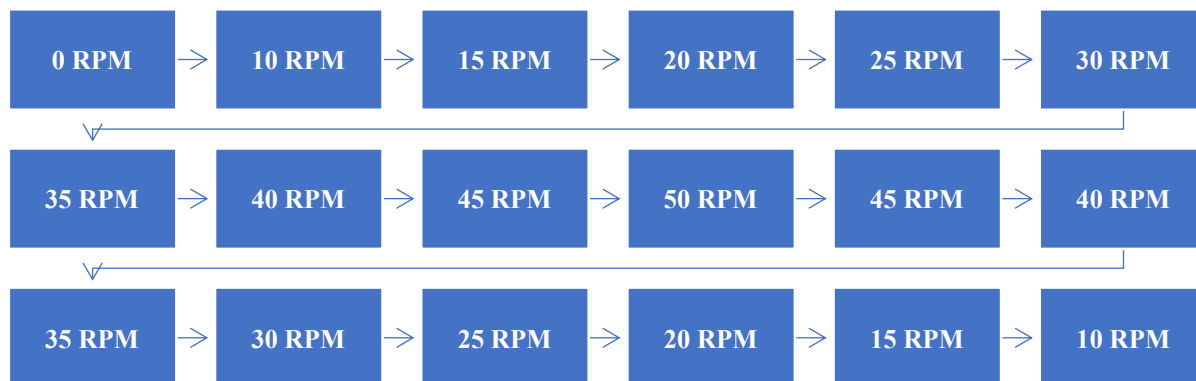
Dessa maneira, foi possível obter as curvas de histerese do sistema, assim como o valor do módulo da área de histerese a partir do método de cálculo dos trapézios, possibilitando assim a análise da existência ou não da histerese no sistema, assim como o seu comportamento.

3.3. DECLARAÇÃO DE USO DE IA

Este documento contou com o apoio de ferramentas de inteligência artificial exclusivamente para a revisão da língua portuguesa, gramática, ortografia e tradução. O uso dessas ferramentas ocorreu de forma ética e responsável, sem prejuízo da autoria intelectual, da

originalidade do conteúdo ou da veracidade das informações apresentadas, que permanecem integralmente sob a responsabilidade do autor.

Figura 10: Fluxograma das taxas avaliadas para a histerese do sistema de GX.



Fonte: Autor, 2026.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia experimental descrita anteriormente. São analisados os efeitos do envelhecimento térmico sobre as propriedades físico-químicas e reológicas dos fluidos de perfuração à base de água fornecidos pela Petrobras. Para isso, foram submetidos há diferentes tempos de exposição à temperatura elevada, utilizando procedimento pré-definidos e a técnica de atenuação de raios gama. O objetivo foi de avaliar a estabilidade da suspensão sólida ao longo do tempo e da altura da coluna de fluido. Por fim, são apresentados os resultados referentes às soluções aquosas de goma xantana em diferentes concentrações, permitindo isolar e compreender a influência do envelhecimento sobre o comportamento reológico do polímero viscosificante.

4.1. AVALIAÇÃO DA UNIFORMIDADE DA VIDRARIA

As leituras realizadas ao longo da altura da proveta apresentaram valores de intensidade praticamente constantes, indicando uniformidade na espessura do vidro da vidraria utilizada. Esse resultado assegura que variações observadas nos ensaios de sedimentação não estão associadas a efeitos geométricos da parede do recipiente.

A verificação da uniformidade da vidraria foi fundamental pois variações na espessura das paredes ao longo da altura podem alterar a área transversal da coluna. Ao confirmar a homogeneidade geométrica da proveta, garantiu-se que as alterações observadas no sistema foram decorrentes exclusivamente do comportamento físico da suspensão, e não de interferências experimentais.

4.2. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE VEDAÇÃO DURANTE O ENVELHECIMENTO

Ao longo do período de envelhecimento térmico em todas as avaliações não foram observadas variações significativas associadas à perda de massa nos fluidos. Isso indicou que o sistema de vedação empregado se mostrou eficiente em evitar a evaporação da fase aquosa.

A ausência de redução observável no volume das amostras sugeriu que a concentração dos constituintes do fluido não foi comprometida. Isso assegura que as modificações posteriormente detectadas decorram, de fato, dos efeitos do envelhecimento térmico e não de eventuais alterações composicionais.

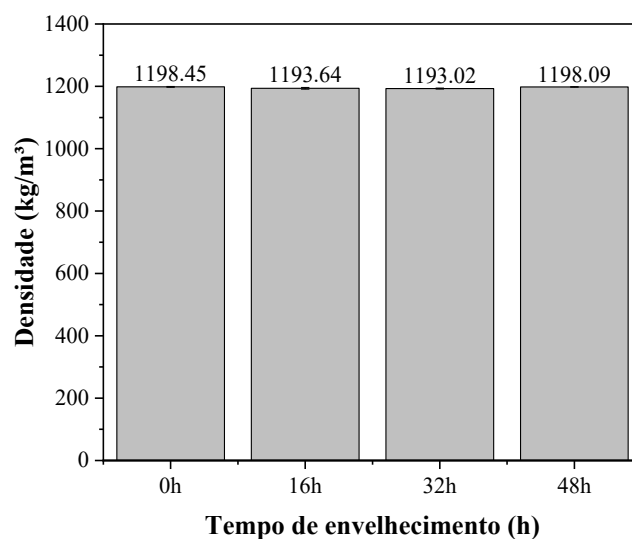
4.3. FLUIDOS DE PERFURAÇÃO BRCARB10

4.3.1. CARACTERIZAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS

4.3.1.1. DENSIDADE DO FLUIDO

As análises de densidade foram conduzidas em triplicata para todos os fluidos investigados, sendo exibidas na Figura 11.

Figura 11: Influência do envelhecimento na densidade do fluido de perfuração.



Fonte: Autor, 2026.

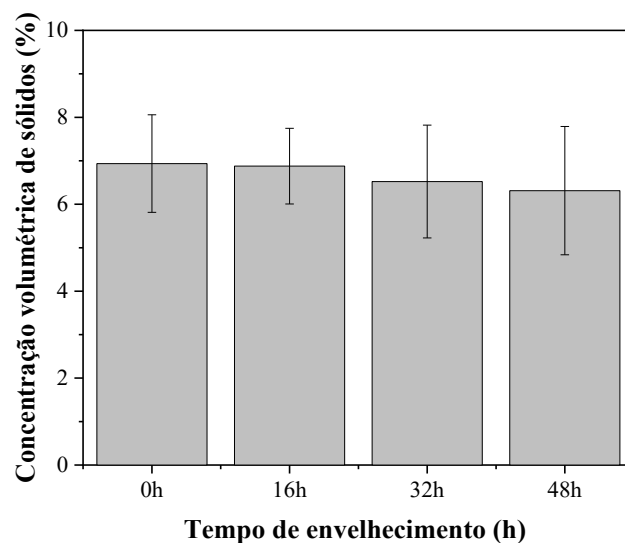
Conforme se observa na Figura 11, mesmo após o envelhecimento acelerado, foram registradas variações de densidade nos fluidos de perfuração. Os valores de densidade obtidos nos diferentes tempos de envelhecimento acelerado (0h, 16h, 32h e 48h) foram submetidos à análise de variância one-way (ANOVA) com nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), utilizando triplicatas para cada condição. O teste de Levene indicou homogeneidade das variâncias entre os grupos.

A análise estatística (ANOVA one-way, $p = 0,00833$) demonstrou que o tempo de envelhecimento acelerado influenciou estatisticamente a densidade do fluido. O teste post hoc de Tukey revelou que a densidade reduziu entre 0h e 32h, e posteriormente aumentou entre 32h e 48h. Não houve diferença estatística entre os valores iniciais (0h) e finais (48h). Esses resultados sugerem que a densidade do fluido não é constante ao longo do envelhecimento.

4.3.1.2. CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

A concentração de sólidos foi avaliada utilizando o método de retorta. A Figura 12 apresenta os valores obtidos para esse parâmetro. Pode-se perceber que o envelhecimento afetou os valores obtidos para a concentração volumétrica de sólidos das amostras, mostrando uma leve diminuição nos valores. Essa leve redução está provavelmente associada a pequenas perdas experimentais durante o manuseio das amostras.

Figura 12: Influência do envelhecimento na concentração de sólidos do fluido de perfuração.



Fonte: Autor, 2026.

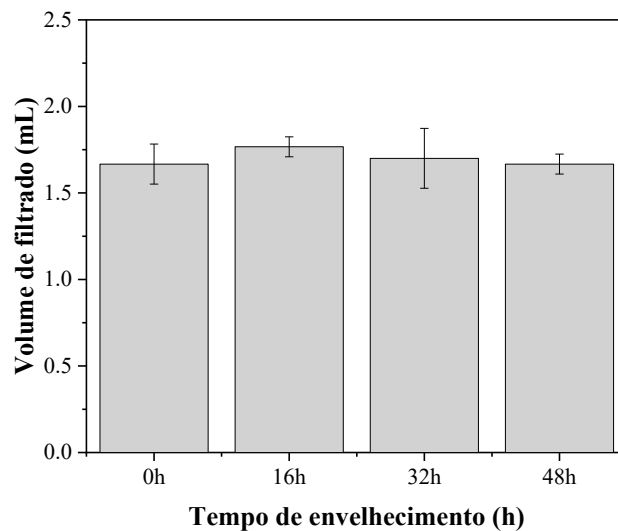
A ANOVA não revelou efeito significativo do tempo de envelhecimento térmico sobre o parâmetro medido na retorta ($p = 0,5718 > 0,05$). Isso significa que, estatisticamente, as médias de concentração volumétrica de sólidos dos 4 tempos avaliados (0h, 16h, 32h, 48h) são consideradas iguais.

Independentemente dessa pequena variação, o resultado indica que não houve perda significativa de sólidos por degradação química ou dissolução, confirmando a estabilidade composicional do fluido comparado ao envelhecimento térmico.

4.3.1.3. VOLUME DE FILTRADO

Outro parâmetro avaliado foi referente ao volume de filtrado obtido quando se aplica uma filtração em alta pressão nos fluidos envelhecidos. O fluido também apresentou estabilidade, sendo o volume de filtrado não afetado pelo envelhecimento nos sistemas, como apresentado na Figura 13.

Figura 13: Influência do envelhecimento na filtração do fluido de perfuração.



Fonte: Autor, 2026.

A ANOVA não revelou efeito significativo do tempo de envelhecimento acelerado sobre o volume de filtrado ($p = 0,67218 > 0,05$). Isso significa que, estatisticamente, as médias dos 4 tempos avaliados (0h, 16h, 32h, 48h) são consideradas iguais para o volume de filtrado.

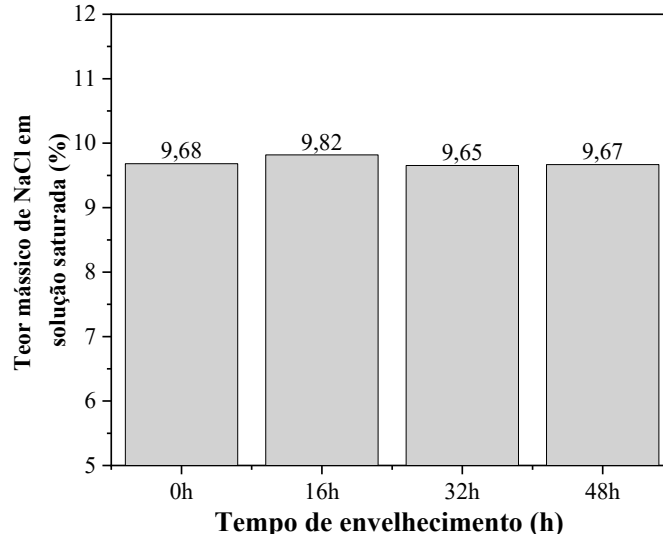
Este resultado indica que o tempo de envelhecimento térmico não influenciou de maneira detectável o volume de filtrado do fluido nas condições experimentais estudadas.

Esse comportamento indica que a integridade da torta de filtração e a capacidade de formação da torta para o teste aplicado não foram comprometidas pelo envelhecimento térmico nas condições avaliadas.

4.3.1.4. TEOR DE SAL

O teor de sal foi avaliado a partir da titulação volumétrica de nitrato de prata, não sendo realizado a leitura em triplicata. Assim como os outros parâmetros, pôde-se observar que os valores não tiveram variações significativas com a aplicação do envelhecimento térmico. A Figura 14 apresenta os valores de teores mássicos obtidos para os fluidos estudados.

Figura 14: Influência do envelhecimento no teor de sal do fluido de perfuração.



Fonte: Autor, 2026.

4.3.2. COMPORTAMENTO REOLÓGICO

O comportamento reológico dos fluidos preparados foi avaliado para as quatro condições de envelhecimento estudadas (0 h, 16 h, 32 h e 48 h). A Tabela 1 apresenta os valores

do índice de consistência (K), do índice de comportamento (n) e da tensão inicial. O índice de índice de consistência (K) está associado à viscosidade do fluido, embora não a represente diretamente, uma vez que a viscosidade aparente também depende do índice de comportamento (n) e da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$).

Para a mesma análise e com valores de n próximos, têm-se um elevado aumento para o fluido de 48h, indicando que o fluido de 48h se tornou mais viscoso, o que está de acordo com a observação da diminuição do valor de n . Também, a tensão mínima necessária para colocar o fluido em movimento (τ_0) variou de forma inconstante, elevando seu valor em 16h e decaindo para 32h e 48h. Isso ilustra que a tensão necessária a se aplicar diminuiu com o envelhecimento térmico, ou seja, tem-se uma maior facilidade ou necessita-se de menos tensão para movimentar o fluido.

Tabela 1: Valores dos parâmetros de Hurschel-Bulkley.

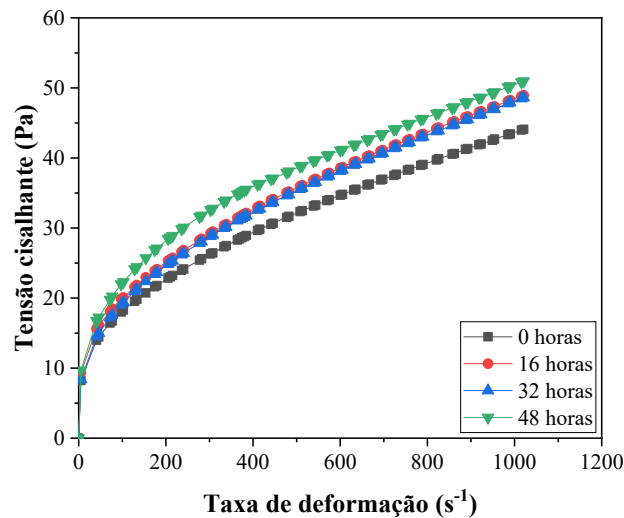
Parâmetro	Tempo de envelhecimento acelerado			
	0 horas	16 horas	32 horas	48 horas
τ_0 (Pa)	$4,8 \pm 0,3$	$8,58 \pm 0,08$	$6,51 \pm 0,08$	$2,3 \pm 0,3$
K (Pa.s ⁿ)	$1,45 \pm 0,07$	$0,91 \pm 0,01$	$1,17 \pm 0,02$	$3,5 \pm 0,1$
n (-)	$0,470 \pm 0,006$	$0,547 \pm 0,002$	$0,516 \pm 0,002$	$0,379 \pm 0,003$
R^2	0,997	0,999	0,999	0,999

Fonte: Autor (2026).

Os valores de R^2 (superiores a 0,997) indicaram um ajuste efetivo do modelo aos dados experimentais, confirmando sua adequação para descrever o comportamento dos fluidos analisados. A Figura 15 apresenta as curvas obtidas para os fluidos avaliados.

Observou-se que todas as amostras apresentaram comportamento não newtoniano do tipo pseudoplástico, caracterizado pela curvatura formada pelos resultados experimentais e verificou-se a presença de tensão limite de escoamento (CHHABRA e RICHARDSON, 2008; MACHADO, 2002).

Figura 15: Curvas de escoamento para o fluido de perfuração nas 4 condições de envelhecimento acelerado.



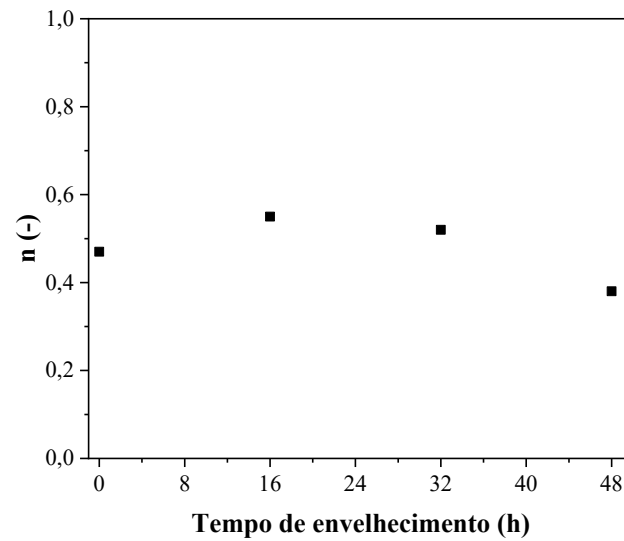
Fonte: Autor (2026).

A comparação entre as curvas reológicas evidenciou que o envelhecimento promoveu alterações no perfil de escoamento dos fluidos. Observou-se que, com o aumento do tempo de envelhecimento, passou a ser necessária uma maior tensão cisalhante para uma mesma taxa de deformação, o que indica modificações na estrutura interna do sistema decorrentes do processo de envelhecimento acelerado.

Além do comportamento dependente da taxa de cisalhamento, avaliou-se a dependência temporal da estrutura do fluido por meio da análise da tixotropia. Esse fenômeno foi investigado a partir da determinação da força gel, parâmetro que permite avaliar a capacidade de reestruturação do material em repouso. A Figura 16 apresenta os valores obtidos para o índice de comportamento do fluido avaliado para as diferentes condições de envelhecimento.

Comparando-se os diferentes tempos de envelhecimento, observou-se que: de 0 h para 16 h, houve aumento do índice, indicando redução da pseudoplasticidade. Para 32 h, houve leve redução do índice, enquanto em 48 h verifica-se queda mais pronunciada ($n = 0,38$), evidenciando intensificação do caráter pseudoplástico após envelhecimento prolongado. Esse comportamento sugere que ocorreram modificações estruturais no sistema, possivelmente associadas à reorganização das partículas sólidas e à alteração da interação polímero-partícula.

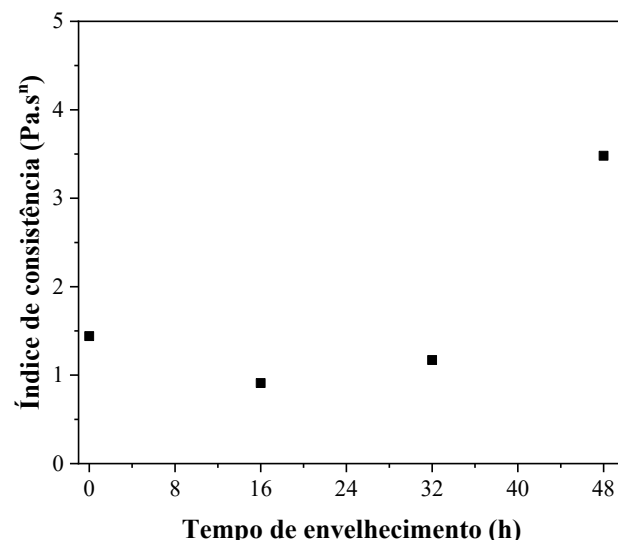
Figura 16: Valores para o Índice de comportamento do Fluido BRCARB10.



Fonte: Autor (2026).

O índice de consistência da Figura 17, relacionado à resistência do fluido ao escoamento, apresentou aumento mais pronunciado para o fluido envelhecido por 48 h. Trabalhos da literatura também relatam modificações nos parâmetros reológicos após envelhecimento térmico. No estudo de Farias *et al.* (2012), os fluidos submetidos a 93 °C apresentaram aumento da viscosidade aparente após o envelhecimento, evidenciando que a exposição térmica pode promover alterações estruturais capazes de elevar a resistência ao escoamento.

Figura 17: Valores para o Índice de consistência do Fluido BRCARB10.



Fonte: Autor (2026).

A tensão limite de escoamento apresentou variação oscilatória para o fluido nas diferentes condições de envelhecimento: aumento em 16 h, seguido de redução em 32 h e 48 h. Essa tendência sugere que, após determinado período de envelhecimento acelerado, o fluido passou a exigir menor tensão para iniciar o escoamento, evidenciando alteração na estrutura interna do sistema.

De forma semelhante, investigações conduzidas a temperaturas ainda mais elevadas ($\approx 180\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante as medições reológicas demonstraram que a alta temperatura favorece reorganizações estruturais internas e aumento do ponto de escoamento, especialmente em sistemas com maior teor de sólidos estruturantes (FARIAS *et al.*, 2012).

Além disso, embora Félix *et al.* (2007) tenham variado apenas a concentração do viscosificante (e não submetido as amostras a envelhecimento acelerado), seus resultados mostram que o aumento do índice de consistência (K) está diretamente associado a modificações na estrutura interna do fluido. De forma análoga, no presente estudo, o envelhecimento acelerado provocou elevação do índice de consistência K , sugerindo que os parâmetros tempo e/ou temperatura podem intensificar alterações reológicas.

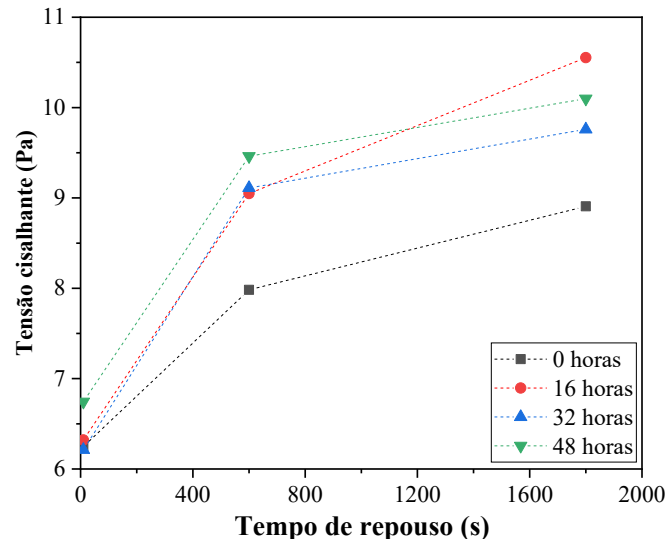
Embora o presente estudo tenha sido conduzido a 65°C e com sistema predominantemente polimérico, os resultados indicam tendência semelhante sugerindo que mesmo em condições térmicas moderadas o envelhecimento pode intensificar interações intermoleculares e promover rearranjos estruturais capazes de aumentar a resistência ao escoamento.

De modo geral, os resultados indicaram que os parâmetros físico-químicos tenham permanecido estatisticamente estáveis ao longo do envelhecimento acelerado. O comportamento reológico foi afetado pelo o envelhecimento acelerado de forma mais significativa. Entretanto, reologicamente os fluidos não apresentaram degradação. Esse fator se explica pois com o aumento do envelhecimento, o índice de consistência aumentou.

O comportamento reológico, entretanto, foi afetado pelo tempo de envelhecimento, com aumento progressivo do índice de consistência (K). Contudo, essa modificação não caracteriza degradação, uma vez que o fluido manteve sua capacidade funcional e os demais parâmetros permaneceram estáveis. A ausência de degradação é corroborada pela manutenção dos parâmetros físico-químicos e pela estabilidade do volume de filtrado, que permaneceu dentro da faixa operacional aceitável.

Avaliou-se a resposta dada quando o fluido é submetido a uma baixa taxa constante de deformação (s^{-1}) a partir de diferentes tempos de repouso como definido (30 minutos, 10 minutos e 10 segundos). Os resultados são apresentados na Figura 18 a seguir.

Figura 18: Tensão de cisalhamento máxima após repouso do fluido de perfuração em diferentes condições de envelhecimento.



Fonte: Autor (2026).

Observou-se um comportamento onde obteve-se um aumento da consistência e alteração dos parâmetros reológicos. Então, é possível que a aplicação de temperaturas mais elevadas em estudos futuros provoque efeitos distintos. Especula-se que temperaturas superiores a 65°C poderiam induzir degradação térmica acelerada do polímero, com variações no índice de comportamento, no índice de consistência e na tensão de escoamento. Tais hipóteses necessitam ser investigadas em condições HPHT (altas pressões e altas temperaturas).

Os resultados obtidos (Figura 18) indicaram que todas as amostras apresentaram comportamento tixotrópico. Observa-se que o envelhecimento acelerado influenciou a resposta estrutural do sistema, modificando os valores de força gel quando comparados ao fluido não envelhecido. Essas variações evidenciam que o procedimento submetido ao fluido alterou a dinâmica de reconstrução da rede interna do fluido, impactando sua estabilidade estrutural e sua resposta sob condições operacionais.

4.3.3. AVALIAÇÃO DA SEDIMENTAÇÃO DE SÓLIDOS EM FLUIDOS DE PERFURAÇÃO ENVELHECIDOS

O monitoramento da sedimentação gravitacional em batelada, simulando condições nas quais o fluido permanece em repouso, foi realizado por meio da Técnica de Atenuação de Raios Gama. Para tanto, antes da apresentação dos resultados referentes à distribuição da concentração volumétrica de sólidos ao longo do processo de sedimentação, nas diferentes condições de envelhecimento, foram determinados o tempo de resolução do sistema e a constante de calibração.

A determinação da concentração de sólidos nos fluidos de perfuração à base aquosa constituiu um dos principais parâmetros analisados neste trabalho, uma vez que a sedimentação influencia diretamente a estabilidade e o desempenho do sistema.

Nesse contexto, os ensaios de sedimentação em batelada foram realizados com o objetivo de avaliar o comportamento do fluido ao longo do tempo, permitindo determinar a concentração inicial da suspensão e acompanhar a evolução do perfil de sedimentação.

4.3.3.1. DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE RESOLUÇÃO DO SISTEMA

A determinação do tempo de resolução do sistema de detecção de radiação foi realizada conforme o procedimento descrito na Seção 3.1.6.5., utilizando-se o método proposto por Damasceno (1992). Com os resultados e utilizando a Equação 14 calculou-se o tempo de resolução do sistema. O valor obtido foi $\tau = 1,97 \times 10^{-4}$ s.

Esse parâmetro é fundamental para a correção das contagens registradas pelo detector, pois leva em consideração o intervalo mínimo necessário para que dois eventos sucessivos sejam identificados como pulsos distintos. Dessa forma, a determinação de τ assegura maior precisão no tratamento dos dados de atenuação e, consequentemente, na estimativa da concentração volumétrica de sólidos ao longo dos ensaios de sedimentação.

4.3.3.2. DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE CALIBRAÇÃO

Para a determinação do parâmetro β , foram utilizadas as contagens de pulsos obtidas em duas condições de referência: (i) com o fluido completamente homogeneizado, correspondente à concentração volumétrica inicial de sólidos; e (ii) na região de líquido clarificado. A partir dessas medidas, calculou-se a constante de calibração para cada condição de envelhecimento avaliada. Os valores obtidos encontram-se apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Constante de calibração para cada condição de envelhecimento.

Parâmetro	Tempo de envelhecimento acelerado			
	0 horas	16 horas	32 horas	48 horas
β (-)	0,08	0,07	0,08	0,09

Fonte: Autor (2026).

Os resultados indicaram que os valores de β foram muito próximos entre si para todas as condições de envelhecimento (0 h, 16 h, 32 h e 48 h). Esse comportamento demonstra que o envelhecimento não alterou de forma significativa a interação entre o feixe de radiação e a fase sólida presente no fluido, mantendo-se praticamente constante a resposta do sistema de detecção.

4.3.3.3. DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE SÓLIDOS NOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO ENVELHECIDOS

O monitoramento da variação da concentração volumétrica de sólidos, decorrente da sedimentação gravitacional em regime estático, foi realizado por meio da TARG. O fluido de perfuração à base de água foi submetido a diferentes tempos de envelhecimento térmico acelerado e acompanhado ao longo de um período prolongado, com medições em distintas posições da coluna. Isso permite avaliar possíveis gradientes de concentração associados ao processo de sedimentação.

O aquecimento das amostras fornece energia suficiente para promover transformações estruturais que, em condições ambientes, ocorreriam de forma mais lenta. Caenn *et al.* (2017) diz que aditivos poliméricos como a goma xantana apresentam sensibilidade térmica, podendo

sofrer modificações que impactam diretamente parâmetros reológicos como viscosidade aparente, índice de consistência e tensão limite de escoamento.

Como a capacidade de suspensão de partículas em regime estático depende principalmente do comportamento reológico em baixas taxas de cisalhamento, alterações nesses parâmetros podem refletir diretamente na estabilidade da dispersão. O fluido à base de água e carbonato fornecido pela Petrobras foi avaliado em quatro condições distintas, incluindo a situação sem envelhecimento térmico (0 h), utilizada como referência.

A comparação entre o fluido não envelhecido e aqueles submetidos ao envelhecimento permite verificar se a exposição térmica favoreceu ou comprometeu a manutenção dos sólidos em suspensão, evidenciada pela formação (ou não) de gradientes de concentração ao longo da coluna. A Figura 19 apresenta os perfis de concentração volumétrica de sólidos em função do tempo para cada condição de envelhecimento avaliada.

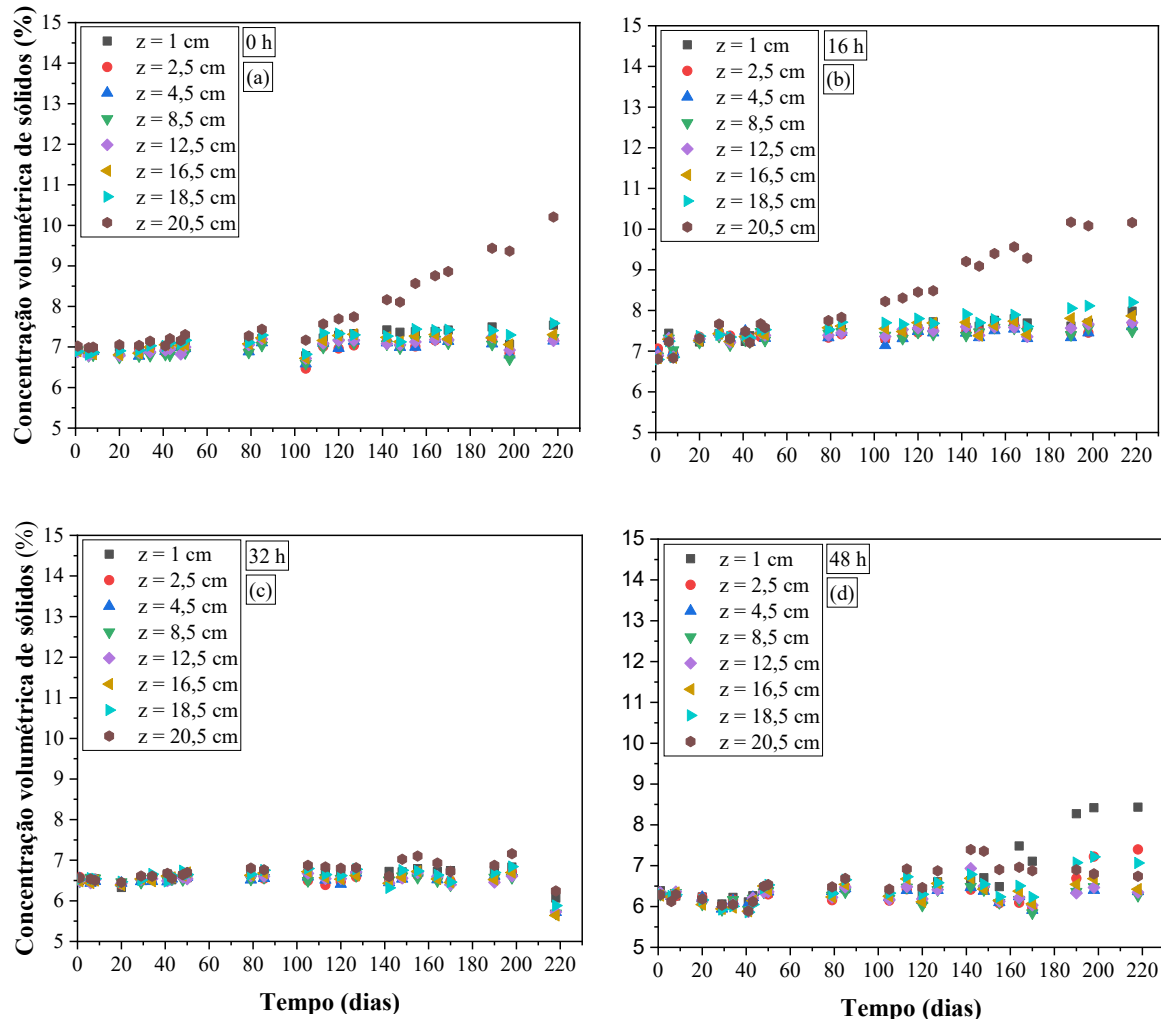
Devido à estabilidade do fluido, não foi observada, nos primeiros 150 dias de análise, a formação de região de líquido clarificado. Entretanto, pôde-se observar um aumento de concentração de sólidos para dois dos experimentos, sendo esse um fator incompatível com o fenômeno da sedimentação que se observa. Esse fator pode ser explicado devido ao fato do aparecimento e crescimento de uma colônia de fungos no topo da coluna do fluido. Essa colônia foi aumentando ao longo do tempo, crescendo no local do topo do fluido. Dessa maneira, a existência dessa colônia crescente no topo da proveta provavelmente provocou um aumento de um fenômeno que fez com que o sinal recebido pelo software fosse menor, já que a incidência de radiação recebida será menor devido a existência de um meio físico bloqueando a passagem do feixe de radiação.

Como o método de avaliação por atenuação de radiação gama utiliza o parâmetro R_0 determinado a partir da região clarificada, foi necessária a realização de um ensaio complementar utilizando água destilada na mesma proveta e sob as mesmas condições experimentais. Esse fator teve como objetivo de simular essa região e obter o valor de referência para os cálculos.

Os resultados obtidos indicaram que não houve sedimentação observável nas amostras analisadas tanto para os fluidos envelhecidos quanto para os não envelhecidos, dentro do período avaliado. Não foram identificadas variações significativas no perfil de concentração ao longo da coluna, nem formação de interface definida entre fase clarificada e região sedimentada. Apenas no fluido envelhecido por 48h foi observável um início de aumento de

concentração no fundo da coluna. Esse comportamento evidencia a elevada estabilidade do sistema, sugerindo que as propriedades reológicas do fluido foram suficientes para manter os sólidos em suspensão nas condições experimentais estudadas.

Figura 19 - Perfis de concentração volumétrica de sólidos em função do tempo para o fluido de perfuração submetido a envelhecimento térmico acelerado por (a) 0, (b) 16, (c) 32 e (d) 48 horas.



Fonte: Autor (2026).

De modo geral, verificou-se que durante aproximadamente os primeiros 100 dias de monitoramento as suspensões mantiveram distribuição de concentração praticamente uniforme ao longo da coluna. Isso acaba evidenciando a elevada estabilidade do sistema mesmo após o envelhecimento térmico. Apenas em tempos mais avançados foi possível identificar indícios iniciais de sedimentação nas regiões superiores, sobretudo nos fluidos submetidos a maiores tempos de envelhecimento.

Esse comportamento indica que, nas condições estudadas (65°C), o envelhecimento acelerado não comprometeu significativamente a capacidade de sustentação das partículas de carbonato de cálcio. Em algumas situações, observou-se inclusive um aparente retardo no início da sedimentação. Esse resultado pode estar associado a modificações estruturais promovidas pelo envelhecimento, previamente discutidas na análise reológica. Logo, especialmente aquelas modificações relacionadas ao aumento da resistência ao escoamento em baixas taxas de cisalhamento, parâmetro diretamente ligado à manutenção de sólidos em suspensão (CAENN *et al.*, 2017).

Os resultados obtidos para o fluido não envelhecido (0 h) foram comparados com estudos de sedimentação conduzidos no próprio laboratório utilizando a técnica de atenuação de radiação gama. Observou-se comportamento semelhante ao reportado para fluidos de perfuração estabilizados, nos quais a concentração volumétrica de sólidos permanece praticamente constante ao longo da coluna durante os estágios iniciais de monitoramento. Fagundes (2015) no estudo com o fluido Br-Mul a distribuição de concentração ao longo da altura também se manteve uniforme no período inicial, com formação de fase clarificada apenas em tempos mais avançados de sedimentação. Esse comportamento é característico de sistemas com elevada resistência ao escoamento em baixas taxas de cisalhamento, nos quais a estrutura interna do fluido é capaz de retardar a migração gravitacional das partículas.

Conforme discutido por Caenn *et al.* (2017), o tipo e a concentração de sólidos influenciam significativamente a viscosidade do sistema especialmente em baixas taxas de cisalhamento, impactando diretamente a capacidade de sustentação das partículas. Dessa forma, a análise da distribuição de concentração no fluido não envelhecido pôde ser comparada tanto a resultados previamente reportados no laboratório quanto a dados da literatura. Esse fator permite avaliar se o comportamento observado está em consonância com sistemas aquosos poliméricos semelhantes.

Para o fluido estudado no presente trabalho, o fluido não envelhecido apresentou padrão compatível com esse tipo de sistema estabilizado, evidenciado pela ausência de gradiente significativo de concentração nos primeiros dias de análise. Tal resultado indica que inicialmente o sistema possuía estrutura reológica suficiente para manter as partículas em suspensão, comportamento coerente com o descrito por Caenn *et al.* (2017). Os autores destacam a importância da viscosidade em regime de baixo cisalhamento e do limite de escoamento na sustentação de sólidos.

Em relação aos fluidos submetidos ao envelhecimento térmico os resultados indicaram que a exposição a 65 °C por até 48 h não trouxe a instabilidade esperada da sedimentação ao longo do período analisado. Esse comportamento pode ser comparado a estudos de envelhecimento térmico reportados na literatura, nos quais determinadas formulações de fluidos à base de água apresentaram manutenção ou até elevação de parâmetros reológicos após envelhecimento associada a rearranjos estruturais internos. Trabalhos como o Farias *et. al* (2012) demonstraram que fluidos envelhecidos a temperaturas elevadas podem apresentar aumento de viscosidade aparente após o envelhecimento, indicando modificações estruturais capazes de aumentar a resistência ao escoamento. De maneira semelhante, o trabalho de Amorim *et al.* (2007) reporta que variações na concentração de agentes viscosificantes impactam diretamente o índice de consistência, refletindo alterações na estrutura interna do sistema.

Embora os estudos citados envolvam formulações distintas da presente pesquisa, o princípio físico permanece o mesmo: modificações estruturais promovidas por variações térmicas ou composicionais alteram os parâmetros reológicos. Isso especialmente para aqueles associados ao regime de baixo cisalhamento, influenciando diretamente a capacidade de suspensão das partículas. Assim, a manutenção da estabilidade observada após o envelhecimento sugere que, nas condições avaliadas, as alterações estruturais promovidas pelo tratamento térmico aumentaram a resistência do sistema à sedimentação.

Inicialmente, o estudo propunha-se a avaliar exclusivamente o efeito do envelhecimento térmico sobre a sedimentação dos sólidos ao longo do tempo. No entanto, a elevada estabilidade observada na escala temporal adotada evidenciou a necessidade de investigar de maneira mais aprofundada os possíveis efeitos do envelhecimento sobre os constituintes do fluido. Dessa forma, paralelamente às análises de sedimentação, adotou-se a estratégia de submeter uma solução aquosa contendo goma xantana ao envelhecimento acelerado, seguida de caracterização reológica, o que permitiu compreender, de modo integrado, como alterações estruturais impactam a estabilidade global do sistema.

4.4. SOLUÇÕES AQUOSAS DE GOMA XANTANA

4.4.1. COMPORTAMENTO PSEUDOPLÁSTICO

Com o objetivo de compreender de forma isolada os efeitos do envelhecimento sobre o principal agente responsável pelo comportamento reológico dos fluidos de perfuração à base de água, investigou-se o desempenho reológico de soluções aquosas de goma xantana submetidas a diferentes temperaturas para simular o envelhecimento do fluido. Essa abordagem complementou a análise do fluido como sistema multicomponente. Assim, permitiu-se identificar de maneira mais precisa as alterações estruturais associadas ao polímero viscosificante e sua contribuição para a estabilidade global do sistema.

Em análises reológicas, avalia-se o comportamento da tensão de cisalhamento em função da taxa de cisalhamento, obtendo-se o reograma do fluido. Fluidos newtonianos apresentam relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento com viscosidade constante. Fluidos não newtonianos por sua vez apresentam comportamento não linear nessa relação.

Neste estudo, foram avaliadas soluções de goma xantana nas concentrações de 0,2% e 0,4% (m/m), submetidas a envelhecimento térmico nas temperaturas de 50 °C, 75 °C e 85 °C, além de uma condição de referência não envelhecida, mantida em temperatura ambiente.

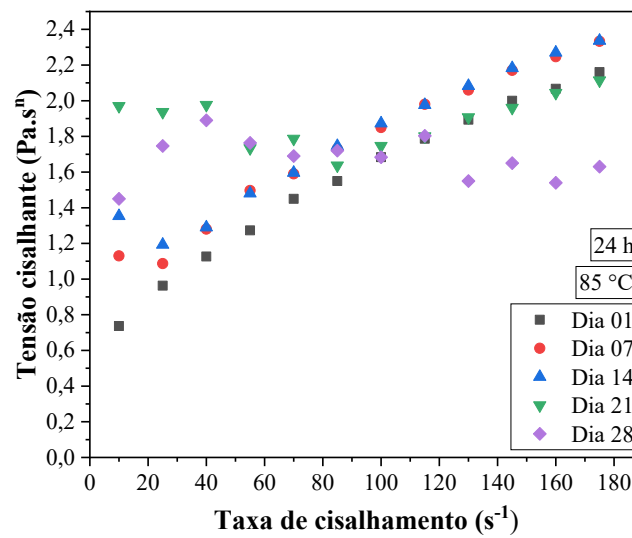
A avaliação reológica baseou-se na obtenção das curvas de viscosidade aparente em função da taxa de deformação aplicada, bem como na análise dos parâmetros resultantes do ajuste dos dados experimentais ao modelo de Herschel-Bulkley modificado.

A adoção desse modelo modificado permitiu uma avaliação mais efetiva do comportamento reológico dos fluidos estudados. O modelo original, sem adequação, não possibilitava a obtenção consistente dos valores de n e K , o que dificultava a interpretação do desempenho dos fluidos à base de goma xantana. Por essa razão, optou-se pelo ajuste matemático do modelo, de modo a viabilizar a análise do comportamento dos parâmetros reológicos sem comprometer a coerência física dos resultados. A título de ilustração, a Figura 20 apresenta os dados experimentais utilizados na tentativa de ajuste ao modelo de Herschel-Bulkley sem adequação.

Pela Figura 20, observa-se a dificuldade de interpretação do comportamento reológico quando os dados são tratados diretamente pelo modelo original: os parâmetros de Herschel-Bulkley não convergem para valores fisicamente consistentes. Como exemplo, o ajuste dos dados experimentais ao modelo de Herschel-Bulkley resultou em parâmetros sem significado físico: $\tau_0 = 1,68 \text{ Pa}$, $K = -34980,17 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$ e $n = -66,62$. Embora o valor de τ_0 apresente ordem de grandeza compatível com a tensão inicial esperada para fluidos de comportamento pseudoplástico, os valores estimados para K e n mostraram-se fisicamente inconsistentes: o

índice de consistência não pode assumir valores negativos, e o índice de comportamento deve estar compreendido entre 0 e 1 para fluidos pseudoplásticos, ou ser superior a 1 no caso de fluidos dilatantes. Além disso, a magnitude elevada de K ($-3,5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^n$) associada ao valor fortemente negativo de n (-66,62) sugere que o algoritmo de otimização convergiu para um mínimo local da função objetivo, e não para a solução global do problema.

Figura 20: Curva de tensão cisalhante da solução de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas após envelhecimento por 24h em 85 °C.

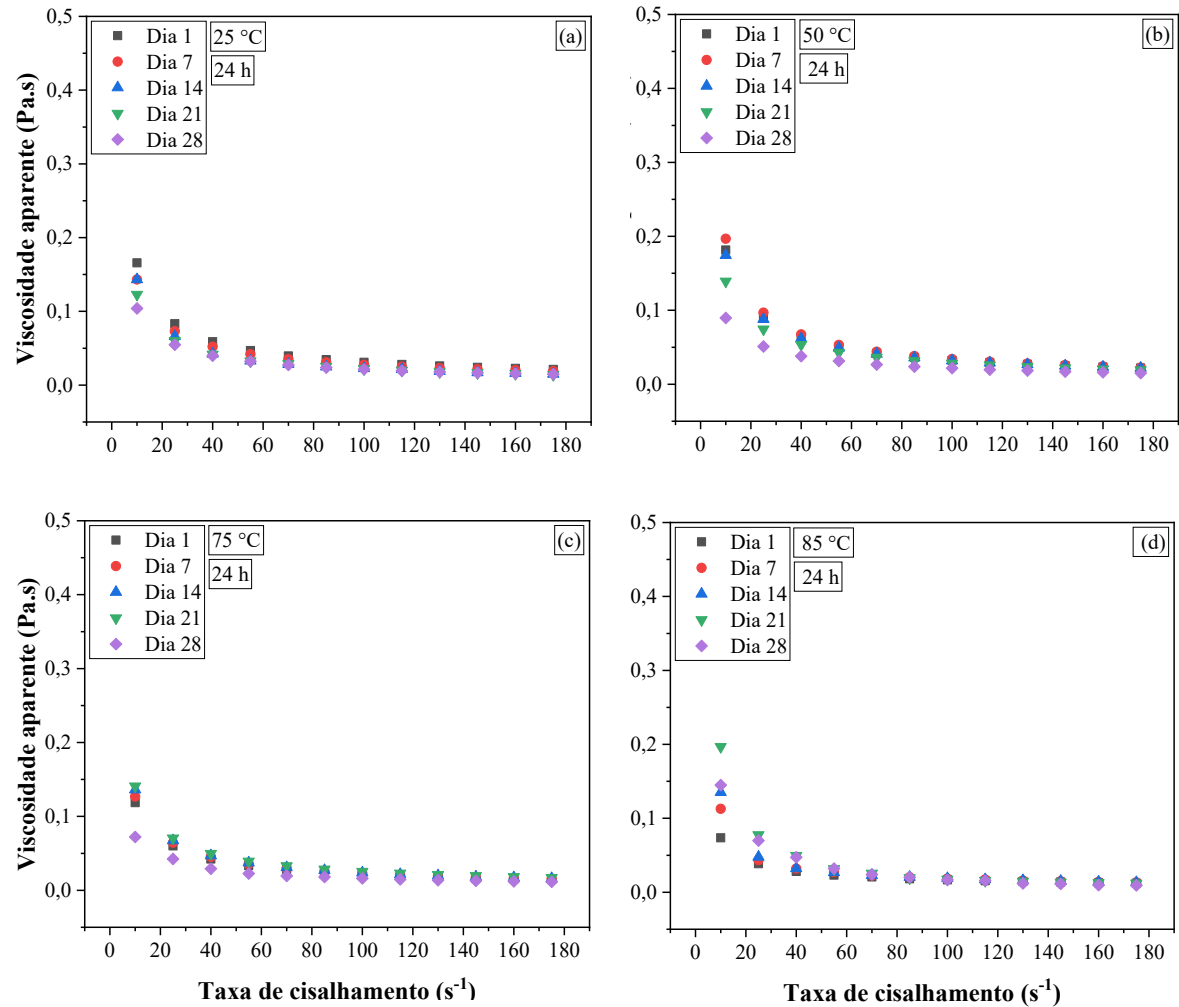


Fonte: Autor (2026).

Diante disso, não foi possível descrever adequadamente o comportamento reológico do fluido ao longo dos dias de envelhecimento a partir do modelo original, o que justificou a adoção do modelo de Herschel-Bulkley modificado com base na viscosidade aparente.

As soluções com concentração de 0,2% são exibidas na Figura 21, enquanto as soluções com concentração de 0,4% são exibidas na Figura 22. Para as soluções de 0,2%, observou-se redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa de cisalhamento, caracterizando comportamento pseudoplástico. Esse comportamento foi consistente para todas as condições de envelhecimento avaliadas. A diminuição da viscosidade com o aumento da taxa cisalhante está de acordo com resultados reportados na literatura (UDO et al., 2019; QUITIAN-ARDILA et al., 2024), que associam esse efeito ao alinhamento progressivo das cadeias poliméricas na direção do escoamento, reduzindo a resistência interna ao movimento.

Figura 21: Curvas de viscosidade aparente das soluções de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento nas seguintes condições: (a) sem envelhecimento, (b) 50 °C por 24 horas, (c) 75 °C por 24 horas e (d) 85 °C por 24 horas.



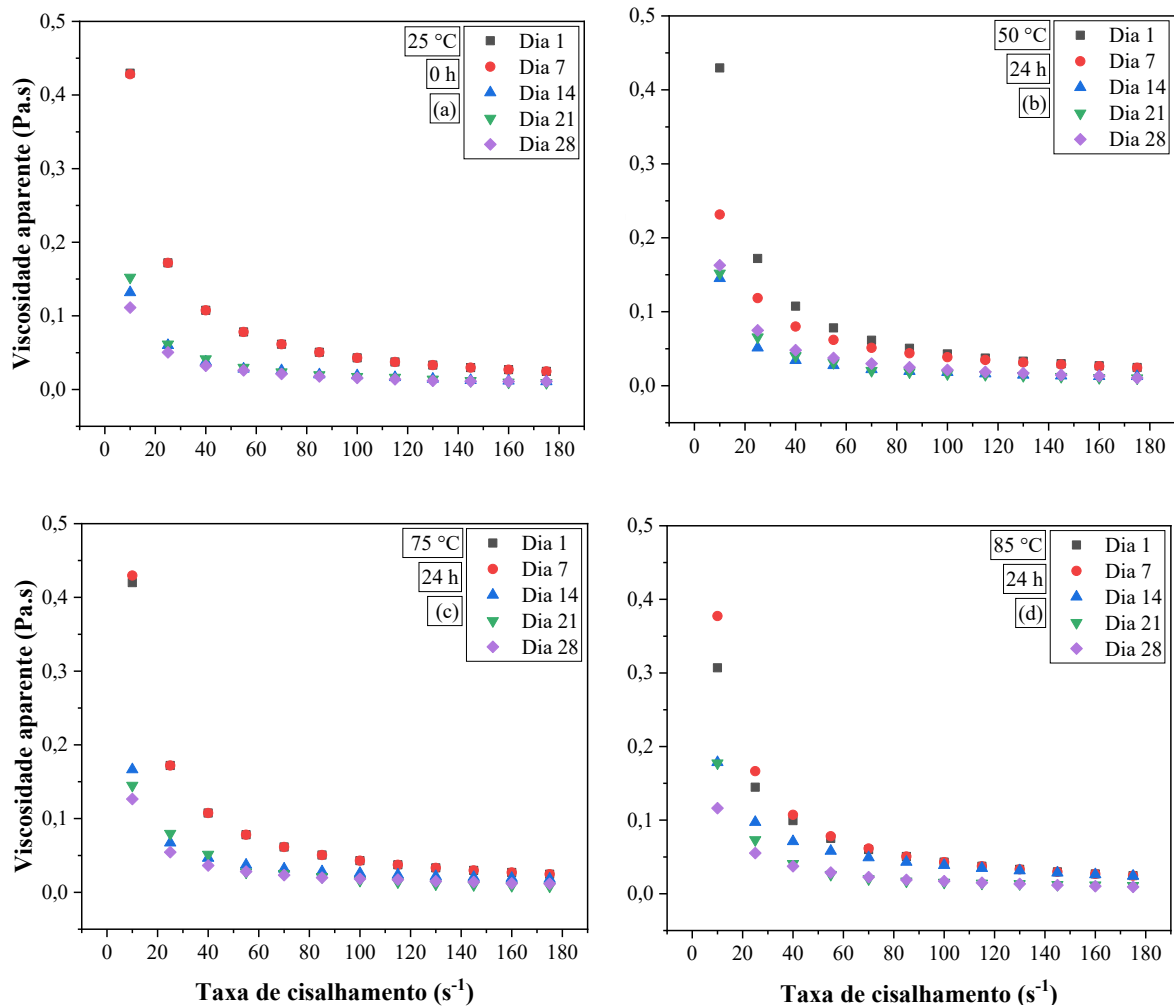
Fonte: Autor (2026).

Para as soluções envelhecidas de 0,2% de concentração, pode-se observar que os valores de viscosidade aparente foram diminuindo com o aumento da taxa cisalhante aplicada no sistema. O valor de viscosidade aparente inicial não variou de maneira significativa no início da aplicação da taxa, e todas amostras avaliadas apresentaram o mesmo comportamento. Esse comportamento é similar ao observado por autores como Udo *et al.* (2019) e Quitian-Ardila *et al.* (2024), que ilustraram como o aumento da taxa cisalhante faz com que o valor de viscosidade aparente diminua.

Para as soluções com concentração de 0,4%, verificou-se comportamento semelhante. Porém, observou-se valores mais elevados de viscosidade aparente em toda a faixa de taxa de

deformação analisada.

Figura 22: Curvas de viscosidade aparente das soluções de goma xantana a 0,4% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento nas seguintes condições: (a) sem envelhecimento, (b) 50 °C por 24 horas, (c) 75 °C por 24 horas e (d) 85 °C por 24 horas.

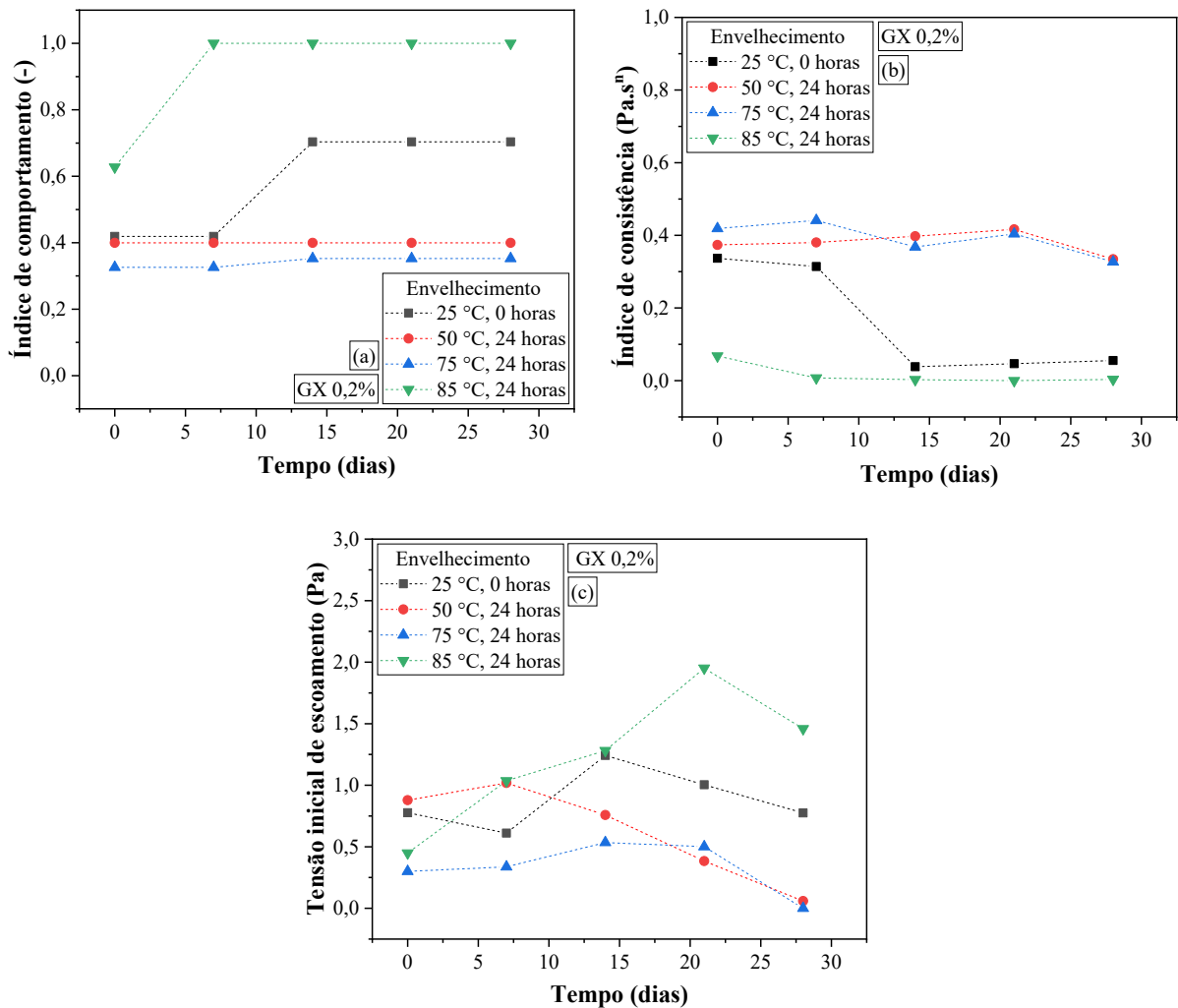


Fonte: Autor (2026).

O aumento da concentração promoveu maior interação entre as cadeias poliméricas, resultando em maior resistência ao escoamento e, consequentemente, maior viscosidade, conforme amplamente descrito na literatura (GARCÍA-OCHOA et al., 2000; SOTO-CABALLERO et al., 2016; UDO et al., 2019; QUITIAN-ARDILA et al., 2024; MELO et al., 2013). Ainda assim, manteve-se o caráter pseudoplástico evidenciado pela redução da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento.

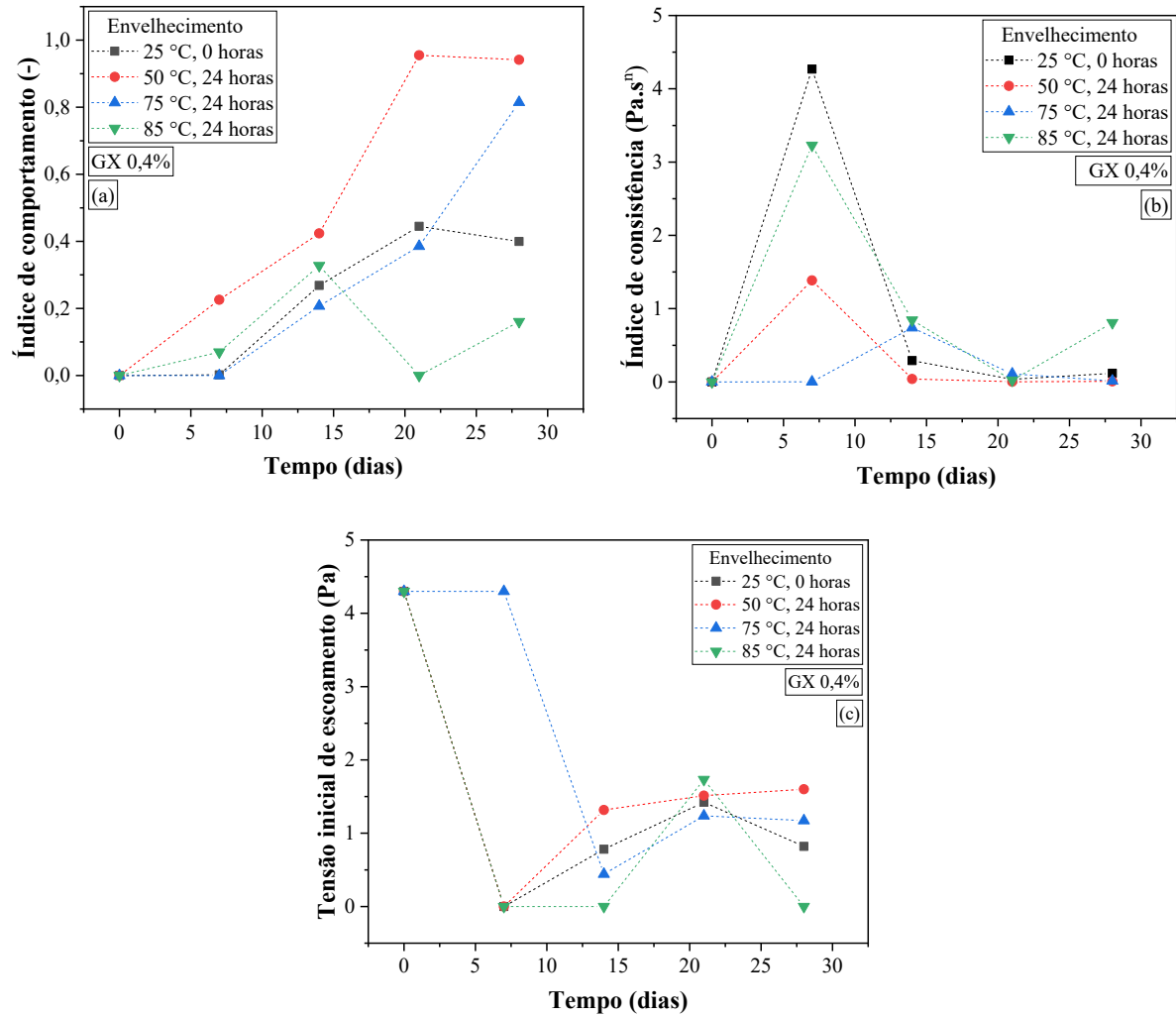
Para quantificar o comportamento reológico, o modelo ajustado de Herschel-Bulkley obteve-se os resultados experimentais, permitindo a determinação do índice de consistência, do índice de comportamento e da tensão de escoamento, conforme apresentado nas Figuras 23 e 24. A avaliação da Figura 21 e dos índices de comportamento da solução GX 0,2% apresentados permitiram verificar o comportamento do polímero GX. Os ajustes obtidos para os parâmetros para a concentração de 0,2% e 0,4% são exibidos nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Figura 23: Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para as soluções de goma xantana a 0,2% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento: (a) índice de comportamento, (b) índice de consistência e (c) tensão inicial de escoamento.



Fonte: Autor (2026).

Figura 24: Parâmetros do modelo de Herschel-Bulkley para as soluções de goma xantana a 0,4% (m/m), obtidas em diferentes dias após envelhecimento: (a) índice de comportamento, (b) índice de consistência e (c) tensão inicial de escoamento.



Fonte: Autor (2026).

Tabela 3: Valores do ajuste R^2 para o Fluido de GX a 0,2%.

Dia	Coeficiente de determinação (R^2)			
	25°C	50°C	75°C	85°C
0	0,999	1,00	0,999	0,999
7	0,999	0,999	0,999	0,995
14	0,999	0,999	0,999	0,986
21	0,998	0,996	0,999	0,998
28	0,996	0,999	0,996	0,988

Fonte: Autor (2026).

Tabela 4: Valores do ajuste R^2 para o Fluido de GX a 0,4%.

Dia	Coeficiente de determinação (R^2)			
	25°C	50°C	75°C	85°C
0	1,00	1,00	0,999	0,999
7	1,00	0,999	1,00	0,999
14	0,999	0,991	0,998	0,999
21	0,999	0,998	0,968	0,995
28	0,999	0,994	0,996	0,998

Fonte: Autor (2026).

No primeiro dia, para a solução GX 0,2% (Figura 23 (a)), a solução apresentou comportamento não newtoniano pseudoplástico ($n < 1$) para todos os envelhecimentos apresentados, aumentando o valor de n com o passar do tempo. Para a amostra de 85°C, percebe-se que, ao longo do tempo, a degradação fez com que o fluido apresentasse um comportamento newtoniano.

Conforme discutido por Borges e Vendruscolo (2008), a estrutura molecular da goma xantana influencia suas propriedades reológicas. No presente estudo, o envelhecimento térmico a 65°C promoveu aumento do índice de consistência (K) das soluções de goma xantana, sugerindo que as alterações estruturais induzidas pela temperatura intensificaram as interações intermoleculares, em consonância com o papel da estrutura molecular apontado por esses autores.

De acordo com Bercea e Morariu (2020), o aquecimento da goma xantana provoca transição conformacional da dupla hélice para um estado desordenado, e o resfriamento pode levar à recuperação incompleta, formando estruturas parcialmente reticuladas. Os resultados do presente trabalho estão de acordo com esse mecanismo: as amostras envelhecidas a 65°C e posteriormente resfriadas apresentaram aumento do índice de consistência (K) e da viscosidade aparente. Esse fator é um indicativo de que o resfriamento após o envelhecimento térmico pode ter induzido a formação de uma estrutura parcialmente reticulada mais resistente ao escoamento, em vez de uma simples recuperação da conformação nativa. Esse comportamento evidencia que variações térmicas podem promover modificações estruturais permanentes ou parcialmente reversíveis, influenciando diretamente a viscosidade e a estabilidade do fluido ao longo do tempo.

A solução GX 0,4% também apresentou um comportamento não newtoniano pseudoplástico ($n < 1$) para todos os envelhecimentos apresentados, aumentando o valor de n com o passar do tempo. A amostra de 50°C apresentou o maior comportamento de degradação, aproximando-se do valor de fluido newtoniano. Esse comportamento pode ser associado às alterações estruturais da goma xantana induzidas pelo envelhecimento térmico.

Esse comportamento pode ser associado às alterações conformacionais da goma xantana em solução aquosa. Embora Garcia-Ochoa *et al.* (2000) tenham observado em medições realizadas em temperaturas moderadas, uma transição gradual da conformação parcialmente ordenada para uma estrutura mais desorganizada, esse fenômeno pode servir como base para entender as alterações induzidas pelo envelhecimento no presente estudo. Isso acaba reduzindo as interações intermoleculares responsáveis pelo comportamento pseudoplástico. Essa desestruturação progressiva resulta na diminuição da dependência da viscosidade com a taxa de cisalhamento, elevando o índice de comportamento e aproximando o fluido de um regime newtoniano.

Quando se tem um aumento de concentração, como ilustrado na Figura 24 (a), observa-se uma diminuição no valor de índice de comportamento inicial para todas condições avaliadas. Como observado por Soto-Cabellero *et al.* (2016), um aumento na concentração indica uma tendência de um comportamento mais pseudoplástico para as soluções de goma xantana. Porém, as amostras em temperatura ambiente e em 85°C mantêm seus valores de índice de comportamento baixos, sem uma tendência de obter um comportamento newtoniano. Um fator que pode explicar isso é que, nessas condições, a estrutura polimérica da goma xantana pode ter permanecido estável. Dessa maneira, não ocorreu degradação térmica significativa capaz de romper a rede responsável pelo comportamento pseudoplástico (QUITIAN-ARDILA, 2021).

Para os valores de K , tem-se uma diminuição do valor ao longo do tempo para ambas as concentrações. Além disso, com o aumento da concentração, teve-se um aumento nos valores de K , como observado por Zhong *et al.* (2013), Soto-Caballero *et al.* (2016) e Udo *et al.* (2019).

Os valores de tensão cisalhante inicial mostraram um aumento inicial quando se aumenta a concentração de goma xantana. Para 0,4%, a tensão inicial necessária diminuiu com o passar dos dias, tendendo a um valor constante. Já para 0,2%, o valor aumentou inicialmente, mostrando uma tendência a diminuição do valor de tensão necessário para ser aplicado para colocar o fluido em movimento.

Zhong *et al.* (2013), Soto-Caballero *et al.* (2016) e Udo *et al.* (2019) observaram que o valor de K aumentou com o aumento da concentração. Entretanto, Udo *et al.* (2019) perceberam que o valor de K cai de valor com o aumento das temperaturas avaliadas, relação que não pode ser observada de maneira clara pelo estudo realizado.

Os valores de tensão inicial de escoamento também aumentaram com o incremento da concentração de goma xantana (Figura 24 (c)), evidenciando maior energia necessária para iniciar o escoamento do fluido. Contudo, com o envelhecimento térmico, observou-se tendência de redução desses valores, particularmente nas condições de maior temperatura. Isso sugere um enfraquecimento das interações intermoleculares responsáveis pela estruturação do sistema.

Pôde-se observar também que a degradação da goma xantana afetou os parâmetros reológicos do fluido. Isso porque a degradação com o passar dos dias provocou mudanças reológicas, causando uma diminuição no caráter pseudoplástico do fluido. Entretanto, não é possível observar uma relação de maneira direta entre a degradação do polímero com a estabilidade sedimentar, pois outros parâmetros do fluido de perfuração ajudaram a manter a estabilização, mesmo com a aplicação de temperatura suficiente para degradação da GX.

De maneira geral, os resultados indicaram que o envelhecimento térmico possivelmente afeta as propriedades reológicas da goma xantana, promovendo redução do índice de consistência e alterações na tensão inicial de escoamento.

Tais modificações são dependentes tanto da concentração quanto do tempo de envelhecimento aplicado. Este fator evidencia que a estabilidade reológica do polímero é sensível às condições térmicas impostas, impactando de forma contrária ao que se era esperado o desempenho de fluidos de perfuração que utilizam esse polímero como agente viscosificante.

4.4.2. ANÁLISE TIXOTRÓPICA PARA A GOMA XANTANA

Para a tixotropia, parâmetro que apresenta como a tensão varia com o tempo de taxa cisalhante aplicado, avaliou-se a resposta dada quando o fluido é submetido a uma baixa taxa constante de deformação (s^{-1}) a partir de diferentes tempos de repouso como definido (30 minutos, 10 minutos e 10 segundos). Os resultados são apresentados na Figura 25 a seguir.

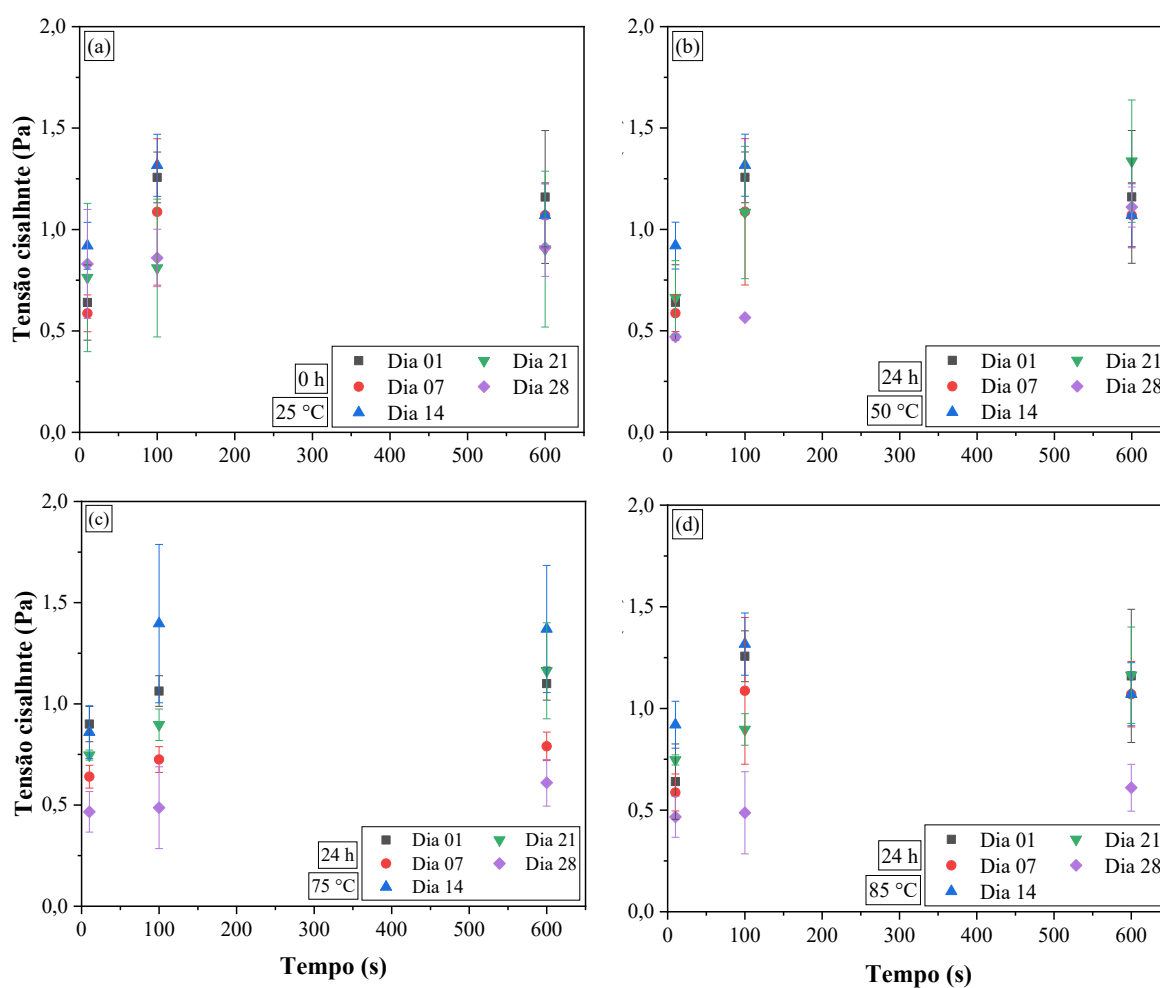
Todos os fluidos avaliados apresentaram comportamento tixotrópico. Pôde-se observar também que as curvas tixotrópicas para a concentração de 0,2% tiveram comportamentos

similares às curvas sem envelhecimento. Com o passar dos dias, os valores de tensão aplicado nos pontos avaliados foram menores para todos os envelhecimentos, indicando uma possível degradação do polímero goma xantana.

Para a concentração de 0,4% de goma xantana, os resultados são apresentados na Figura 26 a seguir. O comportamento tixotrópico também foi observado para essa maior concentração, como apresentado na Figura 26.

Pôde-se observar também que as curvas tixotrópicas para a concentração de 0,4% tiveram comportamentos similares à curva sem envelhecimento, diferindo apenas que os valores de tensão cisalhante aumentaram para uma maior concentração. Com o passar dos dias, os valores de tensão aplicados nos pontos avaliados foram menores para todos os envelhecimentos, indicando uma possível degradação do polímero goma xantana.

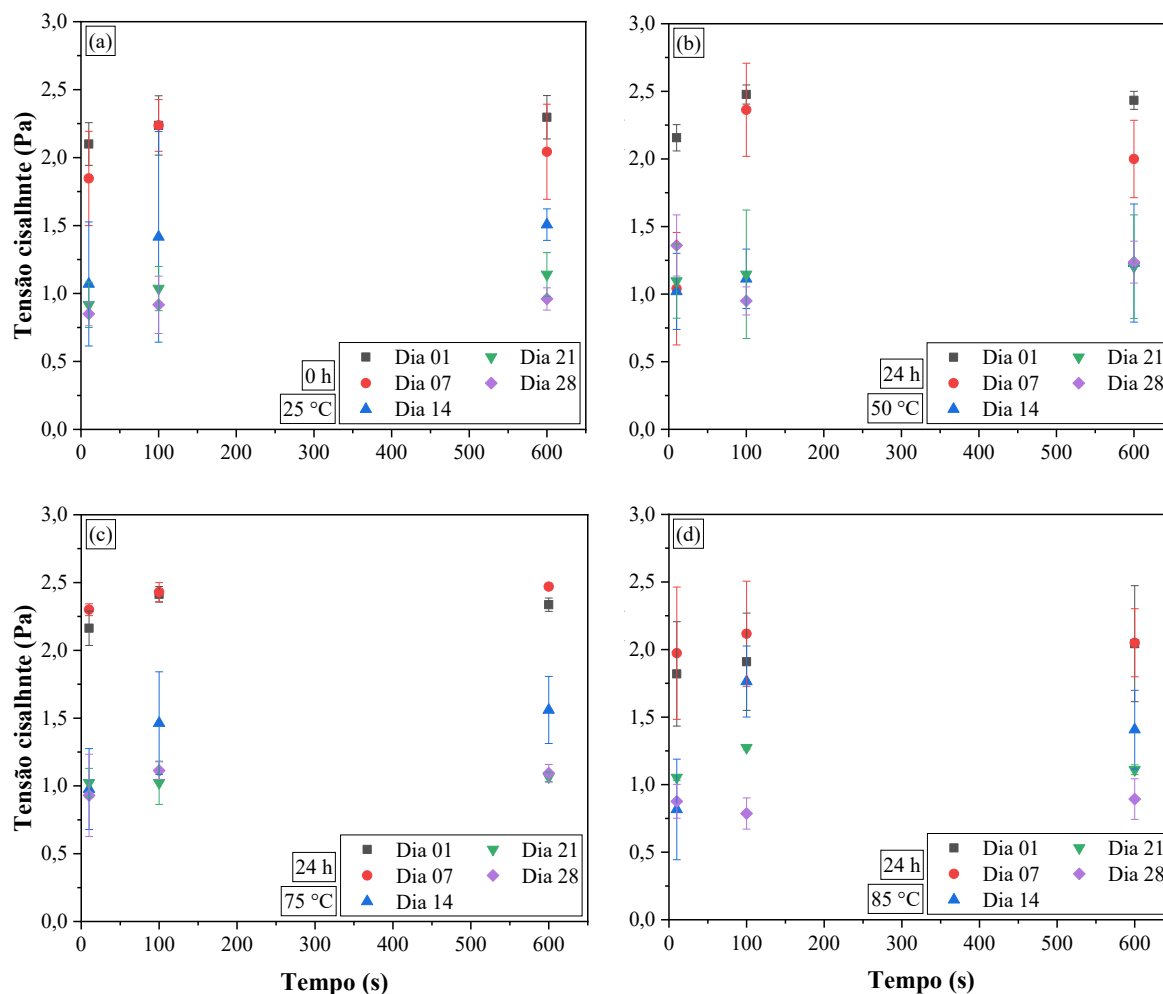
Figura 25: Curvas tixotrópicas para a goma xantana com 0,2%.



Fonte: Autor (2026).

Comparando as duas curvas, pôde-se perceber que esse comportamento é consistente com a literatura que mostra que o aumento da concentração de polímero promove um maior entrelaçamento de cadeias e formação de uma estrutura interna mais robusta, resultando em uma maior resistência à deformação sob cisalhamento (SOTO-CABALLERO *et al.*, 2016). Dessa forma, embora ambas as concentrações apresentem degradação com o passar dos dias, uma maior concentração de goma xantana demonstrou maior estabilidade estrutural, retardando a transição para um regime mais próximo de fluido newtoniano, o que é coerente com os processos físicos envolvidos em soluções poliméricas de alta concentração.

Figura 26: Curvas tixotrópicas para a goma xantana com 0,4%.



Fonte: Autor (2026).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do envelhecimento térmico sobre a sedimentação de sólidos e as propriedades reológicas de fluidos de perfuração à base de água. Para isso, empregou-se a Técnica de Atenuação de Raios Gama (TARG) como ferramenta de monitoramento não destrutivo, aliada a ensaios reológicos sistemáticos. Além disso, teve-se como objetivo investigar de forma isolada a degradação térmica de um dos principais agentes viscosificantes utilizado nesses sistemas, que é a goma xantana.

5.1. CONCLUSÕES

Inicialmente, pode-se concluir que, quanto ao objetivo geral, o envelhecimento acelerado moderado alterou principalmente o comportamento reológico dos fluidos de perfuração à base de água, comprometendo também sua estabilidade físico-química.

O perfil de sedimentação não foi afetado pelo envelhecimento térmico nas condições estudadas, sendo observada estabilidade gravitacional, sem formação de gradientes de concentração por períodos prolongados. Esse fator observado confirma a eficiência da formulação na manutenção dos sólidos em suspensão.

Outra conclusão que se pode destacar sobre o trabalho é que a Técnica de Atenuação de Raios Gama mostrou-se adequada para monitorar a sedimentação ao longo do tempo. Isso pois a técnica permitiu a detecção da ausência de segregação, além de evidenciar sua aplicabilidade como ferramenta não destrutiva na avaliação de estabilidade de suspensões.

Outro fator observável é referente à investigação da relação entre tempo de envelhecimento e a cinética de sedimentação. Pôde-se concluir que o aumento do tempo de envelhecimento não acelerou o processo de sedimentação, indicando que as modificações induzidas pelo envelhecimento não prejudicaram a sustentação das partículas sólidas.

No que se refere à caracterização físico-química antes e após o envelhecimento, concluiu-se que os parâmetros analisados se mostraram sensíveis à exposição do envelhecimento, evidenciando a diferença estatística observada para o parâmetro de densidade

fluido nas condições estudadas. Os resultados mostraram que após o envelhecimento acelerado os fluidos permaneceram sem alterações significativas em teor de sólidos, volume de filtrado e salinidade, mas foi alterado de maneira significativa para sua densidade.

No entanto, em relação à análise das propriedades reológicas, conclui-se que o envelhecimento acelerado possivelmente promoveu rearranjos estruturais no fluido, refletidos em alterações nos parâmetros reológicos, sem caracterizar degradação funcional do sistema.

Durante os ensaios de sedimentação, observou-se um aumento aparente na concentração de sólidos em dois experimentos, o que seria incompatível com o fenômeno esperado de sedimentação. Esse comportamento foi atribuído ao crescimento de uma colônia de fungos no topo da coluna do fluido, que se desenvolveu ao longo do tempo e passou a atuar como um meio físico adicional, bloqueando parcialmente a passagem do feixe de radiação e reduzindo o sinal detectado pelo software. Dessa forma, o aumento de concentração detectado tratou-se de um artefato experimental decorrente da contaminação biológica, e não de um efeito real de sedimentação ou envelhecimento acelerado.

Por fim, quanto ao objetivo de avaliar isoladamente a degradação térmica da goma xantana, concluiu-se que o polímero é sensível ao envelhecimento acelerado, apresentando perda progressiva de capacidade reológica e estrutural. Apesar disso, o fluido completo manteve sua estabilidade, indicando que a interação entre seus componentes contribui para compensar a perda de desempenho do polímero.

De forma geral, os resultados obtidos permitem concluir que os fluidos de perfuração aquosos cedidos pela Petrobras tiveram seus parâmetros afetados pelo efeito de envelhecimento acelerado. Dessa maneira, tais fluidos tiveram alterações em suas propriedades físico-químicas e reológicas dentro de faixas que usualmente são utilizadas na operação, mesmo após envelhecimento a 65 °C por até 48 horas.

Esses resultados contribuem para o avanço do conhecimento na área de fluidos de perfuração, especialmente no que se refere ao comportamento reológico de sistemas envelhecidos e à aplicação de técnicas não destrutivas para monitoramento de sedimentação.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados e nas limitações identificadas ao longo do estudo, sugerem-se a seguir direcionamentos para investigações futuras:

- Realizar uma avaliação em temperaturas mais elevadas: Considerando o impacto nas propriedades do fluido e que os ensaios foram conduzidos a 65 °C, recomenda-se ampliar a faixa de temperatura de envelhecimento para valores superiores (acima de 100 °C). Assim, é possível avaliar o comportamento do fluido em condições mais severas como as encontradas em poços profundos.
- Ensaios com diferentes concentrações de sólidos: A variação da concentração de goma xantana pode influenciar tanto as propriedades reológicas quanto a estabilidade da suspensão. Estudos com diferentes teores de sólidos poderiam elucidar o papel das partículas nos fluidos de perfuração e como a temperatura afeta a conformação do polímero e na manutenção da estabilidade gravitacional.
- Análise viscoelástica: A avaliação das propriedades viscoelásticas dos fluidos, por meio de ensaios oscilatórios, poderia fornecer informações complementares sobre a estrutura interna do sistema e sua evolução com o envelhecimento térmico, especialmente no que se refere à formação e quebra de redes tridimensionais.
- Estudos com outros polímeros: A comparação do comportamento da goma xantana com outros biopolímeros (como goma diutana ou derivados de celulose) permitiria identificar quais sistemas apresentam menores impactos nas propriedades e melhor desempenho em condições de envelhecimento prolongado.
- Aprimoramento metodológico da TARG: A necessidade de utilizar água destilada como referência para R_0 em função da ausência de clarificação aponta para a importância de desenvolver metodologias alternativas de calibração que não dependam da formação espontânea de fase clarificada, ampliando a aplicabilidade da técnica.
- Controle microbiológico em ensaios prolongados: Recomenda-se a adição de biocidas ou conservantes em estudos de longa duração para evitar a proliferação de fungos e bactérias, que podem gerar artefatos nas medições por técnicas não destrutivas como a TARG, atrapalhando a avaliação dos efeitos reais do envelhecimento acelerado sobre a sedimentação.

- Correlação com modelos preditivos: Os dados experimentais obtidos podem ser utilizados para alimentar e validar modelos matemáticos capazes de prever o comportamento reológico e a sedimentação de fluidos de perfuração ao longo do tempo, considerando diferentes condições.

REFERÊNCIAS

- ABCM, Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. Estudo da estabilidade térmica de fluidos de perfuração poliméricos com aditivos de diferentes graus de viscosidade para poços de petróleo e gás. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2012. Trabalho n. CONEM2012-1154.
- ADORJÁN, L.A. A theory of sediment compression. 11th International Mineral Congress, pp. 297–318, 1975.
- AKPAN, Emmanuel U.; ENYI, Godpower C.; NASR, Ghasem G. Enhancing the performance of xanthan gum in water-based mud systems using an environmentally friendly biopolymer. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, v. 10, p. 1933–1948, 2020. DOI: 10.1007/s13202-020-00837-0.
- ALI, M. S.; AL-MARHOUN, M. A. The effect of high temperature, high pressure and aging on water-based drilling fluids. Society of Petroleum Engineers, 1990.
- AL-MARHOUN, M.; RAHMAN, S. Optimizing the properties of water-based polymer drilling fluids for penetrating formations with electrolyte influx. *Erdöl Erdgas*, v. 104, p. 318–323, 1988.
- AMANI, M.; AL-JUBOURI, M. J. An experimental investigation of the effects of ultra-high pressures and temperatures on the rheological properties of water-based drilling fluids. Society of Petroleum Engineers, 2012. DOI: 10.2118/157219-MS.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Recommended Practice for Field Testing Water-Based Drilling Fluids. ANSI/API Recommended Practice 13B-1. 4. ed. Washington, DC: API, 2009.
- AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE (API). Standard Procedure for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids (API Recommended Practice 13B-2). Washington: API, 2023.
- AMORIM, Luciana Viana et al. Desenvolvimento de formulações de fluidos base água para perfurações de poços de petróleo – estudo preliminar. In: PDPETRO, 4., 2007, Campinas, SP. DOI 10.71190/2007-4pdpetro-58-3
- ANNIS, M. R. et al. High-temperature flow properties of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Technology*, Society of Petroleum Engineers, v. 19, n. 8, p. 1074–1080, 1967. DOI: <https://doi.org/10.2118/1698-PA>

- ARDILA, L. H. Q. Rheological and thermal characterization of the effects of high pressure and high temperature on the properties of water-based drilling fluids with xanthan gum. 2021. Dissertação (Mestrado) – Federal University of Technology, Curitiba, 2021.
- AROUCA, F.O. Obtenção Experimental das Equações Constitutivas para o Espessamento e Filtração Utilizando Técnica de Atenuação de Radiações de Altas Energias. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003.
- AROUCA, F.O. Uma Contribuição ao Estudo da Sedimentação Gravitacional em Batelada. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/15096>.
- ASME SHALE SHAKER COMMITTEE. Drilling Fluids Processing Handbook. Gulf Professional Publishing, 2005. ISBN: 9780750677752
- BALDINO, N.; LUPI, F. R.; GABRIELE, D. Rheological properties of food materials. Engineering Principles of Unit Operations in Food Processing: Unit Operations and Processing Equipment in the Food Industry. Elsevier, 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-818473-8.00011-6.
- BARNES, H. A. A handbook of elementary rheology. Institute of Non-Newtonian Fluid Mechanics, University of Wales, 2000. ISBN: 0953803201.
- BARNES, H.A., HUTTON, J.F.; WALTERS, K. An introduction to rheology. Elsevier, Amsterdam, 1989. ISBN: 978-0-444-87469-6.
- BARNES, A. Thixotropy. vol. 0257, no. 97, p. 4–9, 1997.
- BERCEA, M.; MORARIU, S. Real-time monitoring the order-disorder conformational transition of xanthan gum. Journal of Molecular Liquids, vol. 309, p. 113168, 2020. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.113168>.
- BICALHO, I. C. Estudo experimental e de simulação por CFD de escoamentos em seções anulares com excentricidade variável e obstrução parcial da coluna. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.
- BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 2001. ISBN: 0471410772.
- BORGES, C. D.n; VENDRUSCOLO, C. T. Goma Xantana: características e condições operacionais de produção. Semina: Ciências Biológicas e da Saúde, Londrina, v. 29, n. 2, p. 171-188, jul./dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0367.2008v29n2p171>.

- BURGER, R.; CONCHA, F. Mathematical model and numerical simulation of settling of flocculated suspensions. *International Journal of Multiphase Flow*, v. 24, p. 1005–1023, 1998. DOI: 10.1016/S0301-9322(98)00026-3.
- CAENN, R; DARLEY, HCH; GRAY, G. R. *Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids*. Elsevier, 2017. DOI: 10.1016/C2015-0-04159-4.
- CÉSAR, R. A Interação da Radiação Gama com a Matéria no Processo de Esterilização. *Revista Virtual de Química*, v. 6, n. 6, p. 1624–1641, 2014. DOI: 10.5935/1984-6835.20140105.
- CHALLENG, I. A. Xanthan gum: a multifunctional stabiliser for food products. Kelco International Ltd., 1993. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2486-1_17.
- CHESSER, B. G.; ENRIGHT, D. P. et al. High-temperature stabilization of drilling fluids with low-molecular-weight copolymer. *Journal of Petroleum Technology*, Society of Petroleum Engineers, v. 32, n. 6, p. 950–956, 1980. <https://doi.org/10.2118/8224-PA>.
- CHHABRA, R.P.; RICHARDSON, J.F. *Non – Newtonian Flow and Applied Rheology: Engineering Applications*. Second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8532-0.X0001-7>.
- COE, H.S., CLEVENGER, 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.
- CREMASCO, M. A. *Operações unitárias em engenharia química*. Blucher, 2018. ISBN: 9788521213635.
- CUVELIER, G; LAUNAY, B. Concentration Regimes in Xanthan Gum Solutions Deduced from Flow and Viscoelastic Properties. Elsevier, vol. 6, p. 321–333, 1986. [https://doi.org/10.1016/0144-8617\(86\)90023-8](https://doi.org/10.1016/0144-8617(86)90023-8).
- DAMASCENO, J.J.R. *Uma Contribuição Ao Estudo Do Espessamento Contínuo*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1992.
- D'ÁVILLA, J. S. *Um modelo matemático para a sedimentação*. Tese (Doutorado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978.
- FAGUNDES, F. M. *Estudo da estabilidade da suspensão constituinte do fluido Br-Mul/Petrobras*. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015. <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2015.353>.

- FAGUNDES, Flávia Marques. Estudo da sedimentação de partículas em fluidos de perfuração pelo uso da técnica de atenuação de raios gama. 2019. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.28>.
- FAISAL, R. S. et al. Aqueous drilling fluids systems incorporated with green nanoparticles and industrial spent caustic: Optimum rheology and filtration loss properties. In: E3S Web of Conferences, v. 405, p. 01013, 2023. DOI: 10.1051/e3sconf/202340501013.
- FARIAS, K. V.; AMORIM, L. V.; LEITE, R. S.; LIRA, H. L. Avaliação do envelhecimento de fluidos de perfuração poliméricos para poços de petróleo. Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2012.
- FARIAS, K. V.; AMORIM, L. V.; LEITE, R. S.; LIRA, H. L. Efeito do envelhecimento nas propriedades reológicas, de filtração e de lubrificidade de fluidos de perfuração base água, p. 1528-1538. In: 64º Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 2009. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/2594-5327-14871
- FÉLIX, T. F. et al. Desenvolvimento de fluidos de perfuração à base de água com alta capacidade de inibição e alta lubrificidade. PDPETRO, 2007.
- FITCH, E. B. Current theory and thickener design. Industrial and Engineering Chemistry, v. 58, n. 10, p. 18–28, 1966. <https://doi.org/10.1021/ie50682a006>
- FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G.; BISCAIA-JR, E. C. Sobre a simulação da sedimentação em batelada. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS PARTICULADOS, 27., 1999.
- GARCÍA-OCHOA, F. et al. Xanthan gum: production, recovery, and properties. Biotechnology Advances, v. 18, n. 7, p. 549–579, 2000. DOI: 10.1016/S0734-9750(00)00050-1
- GARDNER, R. P.; ELY-JR, R. L. Radioisotope Measurement Applications in Engineering. New York: Reinhold, 1967. ISBN-10: 0278921116.
- GOKDEMIR, M. G.; ERKEKOL, S.; DOGAN, H. A. Investigation of high-pressure effect on drilling fluid rheology. American Society of Mechanical Engineers, 2017. <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-61449>.
- GRAY, G.; NEZNAYKO, M.; GILKESON, P. Some factors affecting the solidification of lime-treated muds at high temperatures. American Petroleum Institute, 1952.
- GUIMARÃES, J. E. P. A indústria da cal no Brasil: panorama do setor no início da década de 80. Associação Brasileira dos Produtores de Cal, 1990.

- HAMACHER, M. E. Um Estudo da Sedimentação Utilizando o Método da Atenuação de Raios Gama. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1978.
- HAMED, S. B.; BELHADRI, M. Rheological properties of biopolymers drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Elsevier, v. 67, n. 3–4, p. 84–90, 2009. DOI: 10.1016/j.petrol.2009.04.001.
- HARRIS, C. C.; SOMASUNDARAN, P.; JENSEN, R. R. Sedimentation of compressible materials: Analysis of batch sedimentation curve. *Powder Technology*, v. 11, p. 75–84, 1975. DOI: 10.1016/0032-5910(75)80026-X.
- HIBBELER, R. C. Resistência dos materiais. Pearson Prentice Hall, 5. ed., 2004. ISBN-10: 9788587918673.
- HILLER, K. et al. Rheological measurements on clay suspensions and drilling fluids at high temperature and pressures. *Journal of Petroleum Technology*, v. 15, n. 7, p. 779–788, 1963. DOI: 10.2118/489-PA.
- IMESON, A. Thickening and gelling agents for food. 2. ed. FMC Corporation (UK) Ltd., Food Ingredients Division, 1997. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-2197-6>.
- KANG, K. S.; PETTITT, D. J. Xanthan, Gellan, Welan, and Rhamsan. 3. ed. Academic Press, Inc., 1993. DOI: 10.1016/B978-0-08-092654-4.50017-6.
- KYNCH, G. J. A theory of sedimentation. *Transactions of the Faraday Society*, p. 166–176, 1952. <https://doi.org/10.1039/TF9524800166>.
- LUMMUS, J. L.; AZAR, J. J. Drilling Fluids Optimization a Practical Field Approach. Tulsa, Oklahoma: PennWell Publishing Company, 1986. 283 p.
- LUVIELMO, M. M.; SCAMPARINI, A. R. P. Goma xantana: produção, recuperação, propriedades e aplicação. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 29, n. 2, p. 171–188, 2009. DOI: 10.4013/ete.2009.51.04.
- MACHADO, J.C.V. Reologia e escoamento de fluidos. Ênfase da indústria do petróleo. Editora Interciência, 258 p., 2002. ISBN-10: 8571930732.
- MACOSKO, C. W. Rheology: principles, measurements and applications. John Wiley & Sons, 1994. ISBN: 1560815795.

- MARTÍN-ALFONSO, M. J. et al. Influence of formate concentration on the rheology and thermal degradation of xanthan gum. *Polymers*, Basel, v. 13, n. 19, p. 3378, 2021. DOI: 10.3390/polym13193378.
- MATOS, S. P. Operações unitárias: fundamentos, transformações e aplicações dos fenômenos físicos e químicos. Érica, 2016. ISBN: 9788536510835.
- MELO, K. C.; DANTAS, T. N. C.; BARROS NETO, E. L. Influência da temperatura na reologia de fluidos de perfuração preparados com carboximetilcelulose, goma xantana e bentonita. *HOLOS*, v. 5, p. 3–18, 2013. <https://doi.org/10.15628/holos.2013.1631>.
- MELLO, P. A. Avaliação dos efeitos de alta pressão e temperatura na reologia de fluidos de perfuração à base olefina. 2020. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2020. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24533>.
- MEZGER, T. G. The rheology handbook: for users of rotational and oscillatory rheometers. 2. ed. Vincentz Network, 2006. ISBN: 3878701748.
- MILAS, M.; RINAUDO, M. Properties of xanthan gum in aqueous solutions: role of the conformational transition. *Carbohydrate Research*, v. 158, p. 191–204, 1986. DOI: 10.1016/0008-6215(86)84017-4.
- MOREIRA, B. A. Estudo da sedimentação em suspensões de fluido com características reológicas pseudoplásticas. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014. <https://doi.org/10.14393/ufu.te.2014.73>.
- NGUYEN, T. et al. Experimental study of dynamic barite sag in oil-based drilling fluids using a modified rotational viscometer and a flow loop. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, n. 78, 2011. DOI: 10.1016/j.petrol.2011.04.018.
- OLISE, O. S.; EKAETTE, N.; OKOLOGUME, W. Effect of Aging on Water Based Mud. *International Journal of Engineering and Modern Technology*, vol. 3, no. 5, p. 26–38, 2017. ISSN 2504-8856.
- PARATE, N. B. A review article on drilling fluids, types, properties and criterion for selection. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, v. 8, n. 9, p. e463–e484, set. 2021. ISSN 2349-5162. Disponível em: <https://www.jetir.org/papers/JETIR2109457.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2025.
- PETROBRAS. Manual de Fluidos/Engenharia de Poços/Petrobras. 1. ed. Rio de Janeiro: Petróleo Brasileiro S.A., 2011.

- QUITIAN-ARDILA, L. H. Rheological and thermal characterization of the effects of high pressure and high temperature on the properties of water-based drilling fluids with xanthan gum. Dissertação (Mestrado) – Federal University of Technology – Paraná, Curitiba, 2021. <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/25380>.
- QUITIAN-ARDILA, L. H. et al. Improving the rheological and thermal stability of water-based drilling fluids by incrementing xanthan gum concentration. AIP Publishing, 2024. DOI: 10.1063/5.0230214.
- RAO, M. A. Rheology of liquid foods: a review. *Journal of Texture Studies*, v. 8, n. 2, p. 135–168, 1977. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1977.tb01173>.
- REINOSO, D. et al. Flow behavior and thermal resistance of xanthan gum in formate brine. *Carbohydrate Polymers*, v. 181, p. 337–345, 2018. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.106881.
- RIBEIRO, G. D. Estudo do carbonato de cálcio tratado com agente de acoplamento Chartwell na substituição parcial de sílica em compósitos de borracha natural. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus Experimental de Rosana, 2020.
- SHANNON, P. T.; STRUPE, E.; TORY, E. M. Batch and continuous thickening. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 9, p. 422–427, 1964. <https://doi.org/10.1021/i160011a014>.
- SILVA, I. G. M.; LUCAS, E. F. Rheological properties of xanthan gum, hydroxypropyl starch, cashew gum and their binary mixtures in aqueous solutions. *Journal of Applied Polymer Science*, 2018. <https://doi.org/10.1002/masy.201800070>.
- SOTO-CABALLERO, M. C. et al. Rheological parameters of xanthan gum/pectin solutions as a function of temperature and composition. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, v. 15, n. 3, p. 859–868, 2016. DOI: 10.24275/rmiq/Alim1068.
- SPEERS, R. A.; TUNG, M. A. Concentration and Temperature Dependence of Flow Behavior of Xanthan Gum Dispersions. *JOURNAL OF FOOD SCIENCE*, vol. 51, no. 1, 1986. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1986.tb10844.x>.
- SRINI-VASAN, S. The Effect of Temperature on the flow properties of clay-water drilling muds. *AIME*, v. 213, p. 438–439, 1958. <https://doi.org/10.2118/975-G>.
- TAHERIAN, A. R.; TRIGUI, M.; RAMASWAMY, H. S. Evaluation of rheological properties of selected salt enriched food hydrocolloids. *Journal of Food Engineering*, v. 48, p. 157–167, 2001. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00153-9.

- THOMAS, J. E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001. ISBN-10: 8571930996.
- UDO, E. et al. Water-based drilling fluids for high-temperature applications and water-sensitive and dispersible shale formations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019. DOI: 10.1016/j.petrol.2019.01.002.
- VIANA, Luara Ribeiro. Uso da concha de marisco na formulação de fluidos de perfuração de petróleo. 2021. Mestrado (Dissertação) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/23457>.
- WANG, Q. Fluid Chemistry, Drilling and Completion. Gulf Professional Publishing, 2021. DOI: 10.1016/C2019-0-04572-4.
- WILLIAM, J. K. M. et al. Effect of CuO and ZnO nanofluids in xanthan gum on thermal, electrical and high-pressure rheology of water-based drilling fluids. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 117, p. 15–27, 2014. DOI: 10.1016/j.petrol.2014.03.005.
- ZHONG, L. et al. Rheological behavior of xanthan gum solution related to shear thinning fluid delivery for subsurface remediation. *Journal of Hazardous Materials*, v. 244–245, p. 160–170, 2013. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.11.028.