



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS**



**FACULDADE DE ENGENHARIA – FAEN**

**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

GABRIEL DE OLIVEIRA FRAIS

MATEUS GOMES PORTOLAN

ANÁLISE DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO E DA TEMPERATURA EM FLUIDOS  
COM CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS SIMILARES AS LAMAS DE PERFURAÇÃO

DOURADOS - MS

2023

GABRIEL DE OLIVEIRA FRAIS

MATEUS GOMES PORTOLAN

ANÁLISE DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO E DA TEMPERATURA EM FLUIDOS  
COM CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS SIMILARES AS LAMAS DE PERFURAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso, apresentado na  
Universidade Federal da Grande Dourados,  
como parte das exigências para a obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: 3.05.00.00-1  
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira.

DOURADOS – MS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

F812a Frai, Gabriel De Oliveira

Análise Das Propriedades Reológicas De Fluidos Com Características Reológicas Similares As Lamas De Perfuração [recurso eletrônico] / Gabriel De Oliveira Frai, Mateus Gomes Portolan. -- 2023.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Bruno Arantes Moreira.

TCC (Graduação em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2023.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Fluido Não-Newtoniano. 2. Goma Xantana. 3. Propriedades Reológicas. 4. Viscosidade. I. Portolan, Mateus Gomes. II. Moreira, Bruno Arantes. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

**ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

Alunos (a): Gabriel de Oliveira Fraís e Mateus Gomes Portolan

Título do trabalho e subtítulo (se houver): ANÁLISE DO EFEITO DA CONCENTRAÇÃO E DA TEMPERATURA EM FLUIDOS COM CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS SIMILARES AS LAMAS DE PERFURAÇÃO

**BANCA EXAMINADORA**

**1. Presidente (orientador):**

Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

**2. Membro:**

Prof. Dr. Rafael Henrique Avanço, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

**3. Membro:**

Prof. Dr. Ramon Eduardo Pereira Silva, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos APROVADO (Aprovado/Reprovado) o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 03 de maio de 2023.

Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira

Prof. Dr. Rafael Henrique Avanço

Prof. Dr. Ramon Eduardo Pereira Silva

## AGRADECIMENTOS

Eu, Gabriel de Oliveira Frai, agradeço:

A Deus, por suas bênçãos e pelas oportunidades dado a mim.

Aos meus pais, Ismael Carlos Frai Junior e Ângela Patrícia de Oliveira Frai, e a minha irmã, Julia de Oliveira Frai, que estiverem sempre presente na minha vida, confiando em mim, por ter me dado essa oportunidade de fazer faculdade fora, pela paciência que tiveram comigo durante todo esse período e por sempre me apoiarem a correr atrás dos meus sonhos.

A minha noiva, Stephanie Caroline Oliveira Joerke, que está comigo desde antes do começo do curso, sempre me apoiando e incentivando em todos os momentos, principalmente no qual eu mais precisava.

A minha família, por me apoiarem no caminho que escolhi trilhar, em especial minha avó Leonice Maria Franchini, que sempre rezou por mim.

Aos meus colegas e amigos que fiz durante o curso, agradeço o apoio e suporte.

A todos os professores e membros do corpo docente que me ajudaram ao longo de meus estudos na universidade. Em particular, gostaria de agradecer meu orientador, Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira, por suas ideias e conselhos perspicazes que me ajudaram a moldar minha pesquisa.

Eu, Mateus Gomes Portolan, agradeço:

Primeiramente a Deus, pelas bênçãos e oportunidade que tem colocado em minha vida.

Aos meus pais e irmã, Anderson Rozendo Portolan, Michelli do Nascimento Gomes Portolan e Priscila Gomes Portolan, pelo apoio e auxílio que tem me dado durante todo o período que passei na universidade e desde antes dela, sendo meus pilares, sempre me encorajando a crescer e não desistir, mesmo nos momentos mais difíceis dando ensinamentos e conselhos, que sem eles não poderia chegar a esse momento.

Aos meus avós e tios, pois, em tudo que precisei, estiveram junto comigo, me apoiando, dando sermões, me aconselhando e, a todo instante, nunca me deixaram desistir.

A meu avô, João da Silva Gomes, que me incentivou e aconselhou a seguir esse ramo de profissão, sendo um exemplo de trabalhador e pessoa, espero ser íntegro e valente, tanto quanto ele é.

A minha família, que tem me dado forças e me acompanhado por toda essa trajetória, sempre demonstrando muito amor e apoio em minhas escolhas.

A minha namorada, Lara Stéphanie Silva Alves, por ser meu apoio nos momentos difíceis e meu incentivo, mesmo quando achei que não fosse conseguir.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Bruno Arantes Moreira, por todo o auxílio que tem nos prestado, pelos conselhos que nos deu, pelo tempo que nos acompanhou e pela paciência que tem tido nos momentos difíceis de nervosismo e ansiedade.

Por último, mas não menos importante, aos meus professores, pelos ensinamentos e conhecimentos passados, as quais levaremos por todo o percurso de nossas carreiras e vidas.

## RESUMO

A etapa de perfuração de um poço de petróleo em lâminas d'água ultraprofundas (como o pré-sal) é uma das operações mais críticas para extração do petróleo e gás. Desta forma, para o sucesso da operação de perfuração existe a necessidade de controlar diversos parâmetros do processo, tais como, o arrefecimento da broca, a manutenção da pressão ideal de operação e o carreamento dos cascalhos para superfície. Essas funções são realizadas, geralmente, por lamas de perfuração. Tais fluidos de perfuração possuem propriedades reológicas (como pseudoplasticidade e tixotropia) cuja a completa compreensão fenomenológica ainda não foi totalmente estabelecida. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho, foi avaliar o efeito da temperatura nas propriedades reológicas de fluidos com características similares as lamas de perfuração. Tal fluido foi preparado a base de goma xantana, polímero comumente utilizado como viscosificante em lamas de perfuração realizadas em operações "off-shore". Neste trabalho foi estudado o comportamento das propriedades reológicas para três taxas de concentração de volume diferentes: 0,2%, 0,3% e 0,4%. Ademais, foi estudado o comportamento da mesma mistura com 0,3% de concentração de goma xantana exposta a variação de temperatura, as quais são: 24°C, 34°C e 44°C. O ensaio foi realizado com a utilização de um viscosímetro digital Brookfield DV-II+Pro e a variação de temperatura foi obtida com o banho térmico Brookfield TC-550. Para cada um dos ensaios, foram impostas taxas de deformações ascendentes no fluido com coleta de informações relacionadas a viscosidade a cada 30 segundos. Os resultados mostraram que o aumento da concentração de polímero na solução, ocorreu o aumento da viscosidade aparente e da pseudoplasticidade do fluido. No entanto, em condições de elevadas taxas de deformação, a influência da concentração mostrou ser uma variável com menor influência na reologia do fluido. Além disso, foi observado que o aumento da temperatura das soluções reduziu a viscosidade aparente e o grau de pseudoplasticidade do fluido.

**Palavras Chaves:** Fluido Não-Newtoniano; Goma Xantana; Propriedades Reológicas; Viscosidade.

## ABSTRACT

The drilling phase of an oil well in ultra-deep water depths (such as the pre-salt) is one of the most critical operations for oil and gas extraction. Thus, for the success of the drilling operation, there is a need to control various process parameters, such as drill bit cooling, maintenance of ideal operating pressure, and carrying of cuttings to the surface. These functions are usually performed by drilling fluids. Such drilling fluids have rheological properties (such as pseudoplasticity and thixotropy) whose complete phenomenological understanding has not yet been fully established. In this context, the main objective of this study was to evaluate the effect of temperature on the rheological properties of fluids with characteristics similar to drilling muds. Such a fluid was prepared based on xanthan gum, a polymer commonly used as a viscosifier in drilling muds used in offshore operations. In this study, the behavior of rheological properties was studied for three different volume concentration rates: 0.2%, 0.3%, and 0.4%. Furthermore, the behavior of the same mixture with a 0.3% concentration of xanthan gum was studied under temperature variation, which was 24°C, 34°C, and 44°C. The test was performed using a Brookfield DV-II+Pro digital viscometer, and temperature variation was obtained using the Brookfield TC-550 thermal bath. For each of the tests, ascending deformation rates were imposed on the fluid with the collection of viscosity-related information every 30 seconds. The results showed that as the polymer concentration in the solution increased, the apparent viscosity and pseudoplasticity of the fluid also increased. However, under conditions of high deformation rates, the influence of concentration was shown to be a variable with less influence on the fluid's rheology. Additionally, it was observed that the increase in temperature of the solutions reduced the apparent viscosity and degree of pseudoplasticity of the fluid.

Keywords: Non-Newtonian Fluid; Xanthan Gum; Rheological Properties; Viscosity.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Processo de Perfuração .....	13
Figura 2.1 – Classificação dos fluidos.....	16
Figura 2.2 – Relação Tensão de Cisalhamento e Tempo .....	17
Figura 2.3a – Reograma .....	18
Figura 2.3b – Diagrama de deformação .....	18
Figura 2.4 – Estrutura Molecular da Goma Xantana.....	21
Figura 3.1 – Goma xantana utilizada.....	24
Figura 3.2 – Balança digital de precisão.....	24
Figura 3.3 – Agitador Mecânico Fisatom.....	25
Figura 3.4 – Banho Térmico com circulação TC-550 da Brookfield.....	25
Figura 3.5 – Viscosímetro Brookfield DV-II+ Pro .....	25
Figura 3.6 – Spindle Brookfield SC4-31 .....	26
Figura 4.1 – Diagrama de Viscosidade para soluções de goma xantana em diferentes concentrações. ....	28
Figura 4.2 – Reograma (Variação de Concentração) .....	29
Figura 4.3 – Viscosidade Aparente em Função da Taxa de Deformação e da Concentração ..	30
Figura 4.4 – Comportamento dos Parâmetros em Função da Taxa de Concentração .....	31
Figura 4.5 – Diagrama de Viscosidade (Variação de Temperatura) .....	32
Figura 4.6 – Reograma (Variação de Temperatura).....	33
Figura 4.7 – Viscosidade Aparente em Função da Taxa de Deformação e da Temperatura....	34
Figura 4.8 – Comportamento dos Parâmetros em Função da Variação de Temperatura .....	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades típicas da goma xantana.....	22
Tabela 3.1 – Relação de Materiais Para o Preparo das Soluções de Goma Xantana .....	26
Tabela 4.1 – Parâmetros da Equação Power-law (Variação de Concentração).....	29
Tabela 4.2 – Coeficiente de determinação da função da taxa de concentração.....	32
Tabela 4.3. Parâmetros da Equação Power-law (Variação de Temperatura) .....	34
Tabela 4.4 – Coeficiente de determinação da função da temperatura. ....	36

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	12
1.1. Objetivo .....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1. Fluidos Newtonianos .....	14
2.2. Fluidos Não-Newtonianos .....	14
2.3. Fluidos Viscoelásticos .....	16
2.4. Fluidos Dependentes do Tempo .....	16
2.5. Tixotrópico .....	17
2.6. Reopético .....	17
2.7. Fluidos Independentes do Tempo.....	18
2.8. Equação de Ostwald-de-Waele ou Power-law .....	19
2.9. Goma Xantana .....	20
2.10. Estrutura.....	20
2.11. Propriedades .....	21
2.12. Influência da Temperatura .....	22
2.13. Influência da Concentração de Polímeros e Sal .....	23
2.14. Comportamento Pseudoplástico .....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS .....	23
3.1. Materiais .....	23
3.2. Preparo das Misturas.....	26
3.3. Preparações para os ensaios.....	27
3.4. Ensaio no viscosímetro .....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	27
4.1. Análise das propriedades reológicas sob as mudanças de concentração.....	27
4.2. Análise das propriedades reológicas sob as mudanças de temperatura.....	32
5. CONCLUSÃO .....	37
5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros .....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39

## ANÁLISE DAS PROPRIEDADES REOLÓGICAS DE FLUIDOS COM CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS SIMILARES AS LAMAS DE PERFURAÇÃO

Gabriel de Oliveira Fraiss, gabriel.frais076@academico.ufgd.edu.br.<sup>1</sup>

Mateus Gomes Portolan, mateus.portolan036@academico.ufgd.edu.br.<sup>2</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

A perfuração dos poços para a extração do petróleo é realizada pela rotação e peso aplicado por uma broca existente na extremidade da coluna de perfuração. Este processo é feito por um sistema, chamado coluna de perfuração, fazendo com que a rocha seja fraturada devido à abrasão com a broca. Os fragmentos são transportados para a superfície através da injeção e do bombeamento de fluidos de perfuração, que podem ser à base de água ou de óleo. (Thomas, 2001; GAUTO et al., 2016)

Como todo o processo de perfuração, a broca utilizada irá aquecer devido ao atrito com os materiais na parede do poço, e o movimento de escavação da mesma irá gerar detritos que podem obstruir o avanço da broca. Tendo em vista esses fatores, faz-se necessário a utilização de um fluido para arrefecimento e limpeza desses detritos. Além disso, o material da parede do poço não é totalmente fixo, podendo sofrer um processo de erosão por desgaste ou pela passagem do fluido de arrefecimento. Para sanar esses e outros desafios que envolvem a operação de perfuração, são utilizados, geralmente, fluidos com formulações complexas, envolvendo propriedades reológicas específicas. Tais fluidos são chamados de lamas ou fluidos de perfuração

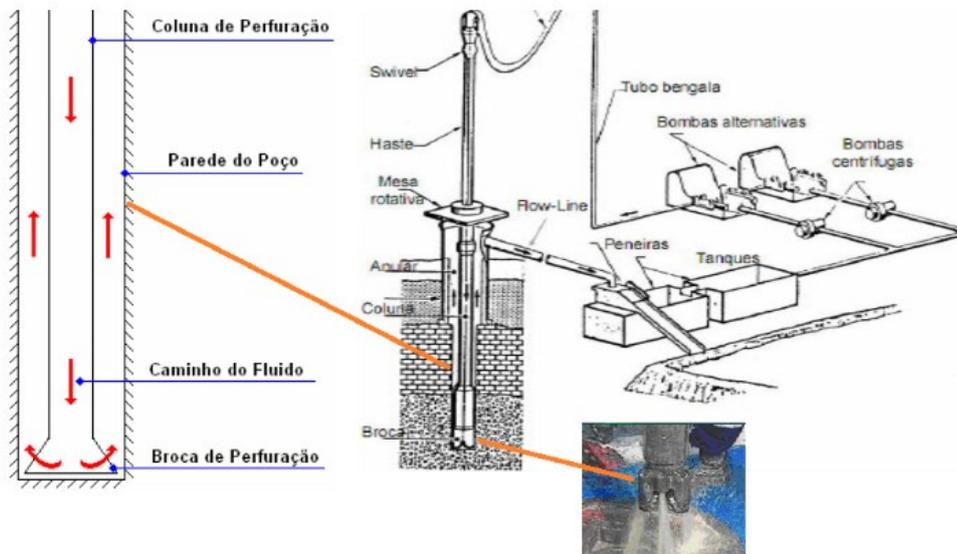
Os fluidos de perfuração são misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. Do ponto de vista químico, eles podem assumir aspectos de suspensão, dispersão coloidal ou emulsão, dependendo do estado físico dos componentes. Os mesmos devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração rápida e segura (Thomas, 2001). Os fluidos de perfuração normalmente contemplam características reológicas não-newtonianas, especificamente geralmente são fluidos pseudoplásticos com certo grau de tixotropia.

Os fluidos pseudoplásticos, os quais tem como característica a variação da sua viscosidade dependendo de certos fatores, são geralmente utilizados para a perfuração de poços de petróleo, pois, essa variação auxilia no carregamento dos cascalhos gerados pela broca até a superfície. Em elevadas vazões volumétricas tais fluidos exibem baixas viscosidades, reduzindo as necessidades energéticas relacionadas ao bombeamento. Em baixas vazões, quando é necessário maior força de arrasto para o transporte dos sedimentos, tais fluidos exibem

maiores viscosidades, auxiliando no transporte destes materiais até a superfície (MOREIRA, 2014).

Além disso, durante paradas operacionais de circulação, o bombeamento do fluido é cessado e as partículas que estavam em movimento ascendente passam a ter uma tendência a iniciarem um processo de deposição gravitacional. Para evitar isso, é interessante que o fluido aumente a viscosidade ao longo do tempo após o mesmo entrar em repouso. Este fenômeno de aumento da viscosidade com o tempo quando o cisalhamento do fluido é cessado é obtido em fluidos tixotrópicos (viscosidade aparente dependente do tempo, Capítulo 2.5), e é conhecido como gelificação. Desta forma, um fluido de perfuração é interessante que o mesmo tenha características reológicas pseudoplásticas e tixotrópicas (MOREIRA, 2014).

Figura 1.1 – Processo de Perfuração



Fonte: <https://pt.linkedin.com/pulse/flu%C3%ADdos-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-ou-lama-fabio-roberto-pereira>

A goma xantana é um pó de cor creme contendo  $\cong 11\%$  de umidade. Após a incineração, aproximadamente nove por cento do produto permanece como resíduo inorgânico composto principalmente de potássio, magnésio, sódio e sais de cálcio. A goma é completamente solúvel em água quente ou fria. Sua síntese enzimática por fermentação sob condições controladas proporciona um polímero estruturalmente uniforme com uma estreita distribuição de peso molecular; esta característica pode contribuir para a extraordinária estabilidade da solução e comportamento de solução da goma xantana (PETTITT, 1979).

Os estudos acerca de fluidos pseudoplásticos com características tixotrópicas, ainda não conseguiram descrever totalmente o comportamento dos mesmos, e, portanto, a compreensão completa dos fenômenos que envolvem tais fluidos ainda não foi totalmente estabelecida.

### 1.1. Objetivo

- Avaliar o efeito da temperatura nas propriedades reológicas de soluções de goma xantana.
- Avaliar o efeito da concentração do polímero nas propriedades reológicas do fluido.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Fluidos Newtonianos

Substâncias nos estados líquido ou gasoso são denominadas fluidos. Uma outra forma de diferenciar fluidos e sólidos é através da propriedade de resistir a uma tensão de cisalhamento aplicada, a qual, quando aplicada em objetos no estado sólido, o mesmo tende a deformar, logo, a tensão de cisalhamento será proporcional a essa deformação, enquanto um fluido se deformaria continuamente, portanto, a tensão será proporcional a denominada taxa de deformação (ÇENGEL; CIMBALA, 2012).

Fluidos podem ser divididos em duas categorias iniciais: os fluidos newtonianos e os fluidos não newtonianos. Um fluido é denominado newtoniano quando a viscosidade é função da temperatura e da pressão, sendo constante em relação a deformação.

Em um fluido newtoniano a tensão de cisalhamento  $\tau_{yx}$  é inversamente proporcional ao gradiente de velocidade ( $\partial v_x / \partial y$ ), surgindo então uma constante de proporcionalidade  $\mu$ , a viscosidade dinâmica. Essa equação formada é denominada Lei da Viscosidade de Newton.

$$\tau_{xy} = -\mu \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (2.1)$$

em que a viscosidade dinâmica  $\mu$  é uma função da temperatura e da pressão.

A tensão de cisalhamento ( $\tau_{xy}$ ) é a força por unidade de área que é necessária para manter um fluido em movimento em relação a outro fluido ou superfície sólida adjacente.

### 2.2. Fluidos Não-Newtonianos

Existe um outro grupo de fluido que não segue a lei da viscosidade de Newton. Estes fluidos são chamados de não-newtonianos e possuem viscosidade dependente de alguns fatores como, a taxa de formação e o tempo. Essas substancias, se situam entre os sólidos que seguem a lei Hooke e os fluidos newtonianos, são estudados pela ciência denominada reologia (COIMBRA, 2015).

A relação entre a tensão de cisalhamento e o gradiente de velocidade para um fluido não-newtoniano está mostrada na Eq. (2.2):

$$\tau_{xy} = \eta \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \quad (2.2)$$

em que  $\eta$  é denominado de viscosidade aparente, uma função da temperatura, da pressão e da taxa de formação. Alguns fluidos não-newtonianos a viscosidade aparente é função também do tempo.

No escoamento dos fluidos, tem-se que a taxa de deformação do mesmo é igual ao gradiente de velocidade, portanto  $\frac{\partial v_x}{\partial y} = \gamma_{yx}$ . A taxa de deformação é a taxa de mudança da deformação de um fluido em relação ao tempo. Substituindo na Eq. (2.2), é obtido a relação de tensão cisalhante e taxa de deformação para um fluido não-newtoniano, no qual a constante de proporcionalidade é a própria viscosidade aparente.

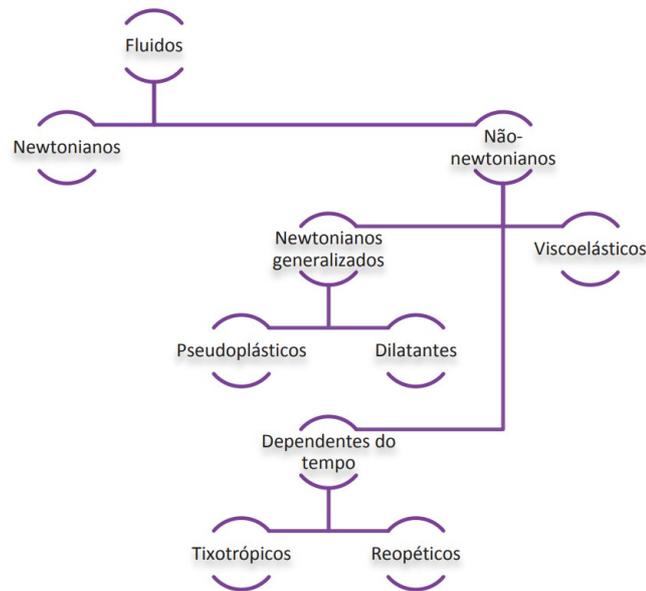
$$\tau_{xy} = \eta \cdot \gamma_{yx} \quad (2.3)$$

Os fluidos não-newtonianos são geralmente agrupados em três categorias, de acordo com CHHABRA (2007):

- a) Fluidos com viscosidade aparente independente do tempo, no qual a taxa de deformação em um ponto depende apenas da tensão de cisalhamento aplicado no mesmo ponto e instante.
- b) Fluidos com viscosidade aparente dependente do tempo, neste a relação entre a taxa de deformação e tensão de cisalhamento depende de outros fatores, como a trajetória do fluido e a duração em que o cisalhamento é imposto.
- c) Fluidos viscoelásticos, exibem características de ambos sólidos elásticos e fluidos viscosos, permitindo uma recuperação elástica parcial após a deformação.

Porém não é limitado a apenas essa classificação, pois grande parte dos materiais mostram uma combinação de dois ou três tipos de características citadas acima. Apesar da denominação geral de “não-newtoniano” referenciá-los corretamente, usualmente são designados como fluidos complexos (SOCHI, 2010).

Figura 2.1 – Classificação dos fluidos



Fonte: ARANTES; AROUCA; DAMASCENO (2018)

### 2.3. Fluidos Viscoelásticos

Essa categoria de fluido apresenta característica de fluido viscoso, porém também tem o comportamento próximo a um sólido elástico, ou seja, dentro de um intervalo na amplitude da força de cisalhamento aplicada sobre o mesmo, podendo retornar a sua condição inicial após a deformação, exibindo uma recuperação elástica parcial (CHHABRA, 2010).

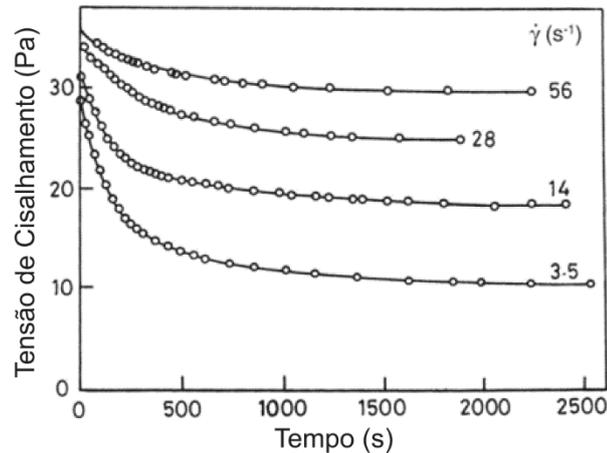
### 2.4. Fluidos Dependentes do Tempo

Muitas substâncias, tanto farmacêuticas, quanto alimentícias, apresentam um comportamento que não pode ser caracterizado nos reogramas. Esse fato se deve a propriedade de suas viscosidades aparentes podem estar sujeitas, também, a outra variável, o tempo. Os fluidos que possuem dependência no tempo podem ser classificados como tixotrópicos e reopéticos.

Em um fluido dependente no tempo, a viscosidade depende não somente do tempo que a tensão de cisalhamento é aplicada sobre eles, mas também ao histórico de eventos que influenciaram a sua microestrutura.

A variação da tensão de cisalhamento em relação ao tempo para uma taxa de deformação constante imposta em um fluido tixotrópico está mostrado a seguir.

Figura 2.2 – Relação Tensão de Cisalhamento e Tempo



Fonte: CHHABRA (2010).

## 2.5. Tixotrópico

De acordo com CHHABRA; RICHARDSON (2011), um material é classificado como sendo tixotrópico se, quando é cisalhado a uma taxa constante, sua viscosidade aparente (ou a tensão de cisalhamento correspondente) diminui com o tempo de cisalhamento. Se a curva de escoamento for medida em um único experimento no qual a taxa de cisalhamento é constantemente aumentada a uma taxa constante de zero até algum valor máximo e depois diminuída na mesma taxa para zero novamente, um loop de histerese da forma é obtido.

Naturalmente, a altura, a forma e a área delimitada pelo loop dependem das condições experimentais, como a taxa de aumento/diminuição da taxa de cisalhamento, o valor máximo da taxa de cisalhamento e a história cinemática passada da amostra. É lógico que, quanto maior a área fechada, mais severo é o comportamento dependente do tempo do material em discussão (CHHABRA, 2010).

## 2.6. Reopético

Os relativamente poucos fluidos que mostram a tixotropia negativa, ou seja, sua viscosidade aparente (ou a tensão de cisalhamento correspondente) aumenta com o tempo de cisalhamento, também são conhecidos como fluidos reopéticos. Neste caso, o loop de histerese é obviamente invertido. Ao contrário dos fluidos tixotrópicos, o cisalhamento externo promove a construção da estrutura neste caso. Não é incomum que o mesmo fluido exiba tanto tixotropia quanto reopexia sob combinações apropriadas de concentração e taxa de cisalhamento (CHHABRA, 2010).

## 2.7. Fluidos Independentes do Tempo

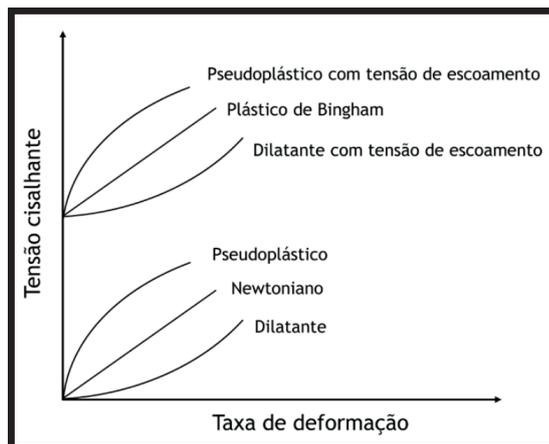
Os fluidos newtonianos generalizados caracterizam-se por apresentarem a viscosidade aparente como uma função da temperatura, da pressão e da taxa de deformação, ou seja, a viscosidade aparente não tem dependência com o tempo (ARANTES; AROUCA; DAMASCENO, 2018).

$$\eta = \eta(T, P, \dot{\gamma}) \quad (2.4)$$

Tais fluidos podem ser subdivididos em três tipos: pseudoplásticos, viscoplástico e dilatantes.

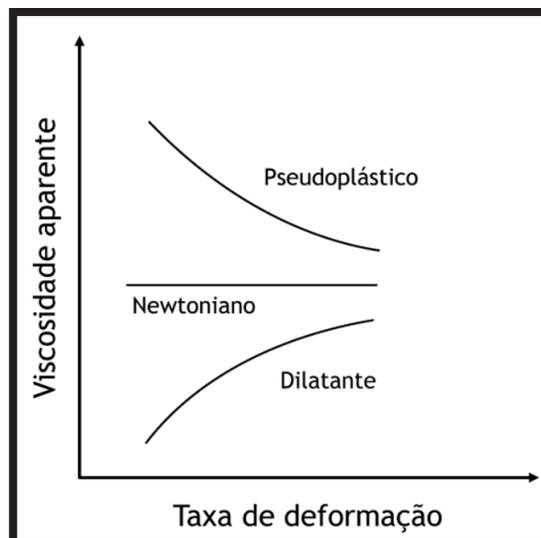
Na Figura 2.3 são ilustrados alguns exemplos do comportamento de fluidos independentes do tempo em um reograma, bem como em um diagrama de viscosidade aparente em função da taxa de deformação.

Figura 2.3a – Reograma



Fonte: MOREIRA et al. (2018)

Figura 2.3b – Diagrama de deformação



Fonte: MOREIRA et al. (2018)

Ao observar a Figura 2.3, verifica-se que:

- Quando o fluido é pseudoplástico, a viscosidade aparente reduz de acordo com o aumento da taxa de deformação.
- Quando o fluido é newtoniano, a viscosidade aparente mantém-se constante com a variação da taxa de deformação.
- Quando o fluido é dilatante, a viscosidade aparente aumenta de acordo com o aumento da taxa de deformação.

## 2.8. Equação de Ostwald-de-Waele ou Power-law

Os fluidos que não possuem tensão inicial de escoamento ou newtonianos generalizados são aqueles que iniciam o escoamento sem a necessidade de uma tensão de cisalhamento. Esses são classificados em pseudoplásticos e dilatantes. Essa classificação se dá a uma relação desenvolvida por Ostwald-de-Waele, chamada de Equação de *Power-Law*, que associa a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação a dois parâmetros ( $m$ ,  $n$ ), sendo  $n$  o índice de comportamento do fluido e adimensional e  $m$  o índice de consistência do fluido ( $Pa \cdot s^n$ ). A Equação Power-law está descrita na Equação (2.5), (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

$$\tau_{xy} = m(\gamma_{yx})^n \quad (2.5)$$

Substituindo na Equação (2.5), tem-se que:

$$\eta = m(\gamma_{yx})^{n-1} \quad (2.6)$$

Essa equação descreve que para  $n < 1$ , o fluido apresenta comportamento pseudoplástico; para  $n > 1$ , comportamento dilatante; e para  $n = 1$ , o fluido apresenta comportamento newtoniano.

Com o passar do tempo, novos modelos foram propostos a fim de corrigir erros gerados pela equação de power-law, como a equação de viscosidade cruzada e o modelo de fluido de Ellis (CHHABRA, 2010).

Comumente, os fluidos pseudoplásticos, devido às suas características, são utilizados como lama de perfuração em escavações de poços. Um exemplo é a mistura a base de goma xantana, tendo um comportamento onde a viscosidade aparente é inversamente proporcional a taxa de deformação, a qual é influenciada pela concentração da substância na mistura, como também a temperatura.

## 2.9. Goma Xantana

Em 1961, a *Northern Regional Research Laboratory* (NRRL), do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos começou a examinar sua grande coleção de culturas microbianas com o objetivo de descobrir biopolímeros. Entre a vasta gama de micróbios examinados, descobriram que a bactéria *Xanthomonas campestris* encontrada em plantas de repolho produz um polissacarídeo extracelular com propriedades reológicas excepcionais. Este polissacarídeo foi denotado polissacarídeo B-1459 e, subsequentemente, recebeu o nome “goma xantana”. Hoje, a goma xantana é o polissacarídeo microbiano mais importante comercialmente (PETTITT, 1979; KATZBAUER, 1998).

A produção de goma xantana começa com a inoculação, nesta fase, a cultura bacteriana de *Xanthomonas campestris* é inoculada em um meio nutriente contendo fontes de carbono e nitrogênio. A cultura é então incubada sob condições controladas de temperatura, pH e aeração. Depois é feito a fermentação, onde as bactérias consomem as fontes de carbono e nitrogênio no meio nutriente e produzem goma xantana como exopolissacarídeo. Quando a fermentação estiver concluída, a biomassa contendo a goma xantana é colhida do meio nutriente. Isso pode ser feito por centrifugação ou filtração. A goma xantana é então recuperada da biomassa usando uma série de etapas de processamento posteriores. Essas etapas normalmente envolvem precipitação, purificação e secagem. Os métodos específicos usados para recuperação podem variar dependendo das matérias-primas e das condições de fermentação usadas. No geral, a produção de goma xantana é um processo complexo que requer um controle cuidadoso das condições de fermentação e das etapas posteriores de processamento para garantir altos rendimentos e pureza do produto final (AARTHY PALANIRAJ; JAYARAMAN, 2011).

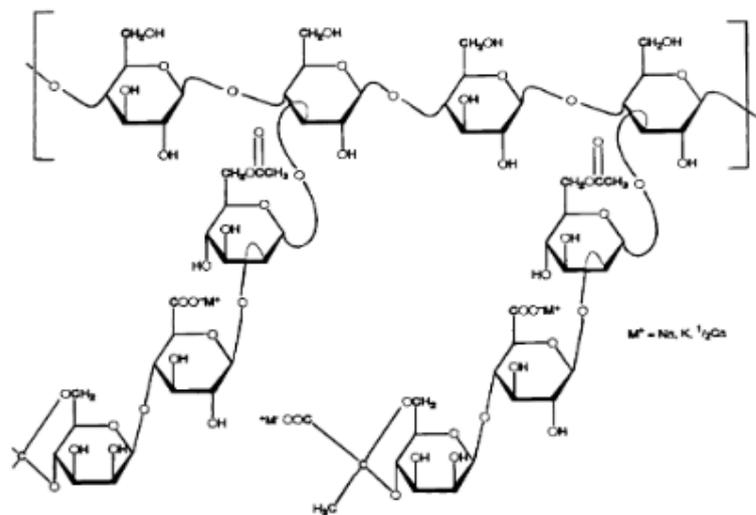
## 2.10. Estrutura

A goma xantana é um heteropolissacarídeo com uma estrutura primária que consiste em unidades de pentassacarídeo repetidas formadas por duas unidades de glicose, duas unidades de manose e uma glucurônica unidade ácida, na razão molar 2,8:2,0:2,0 (Fig. 2.4). Sua cadeia principal consiste em unidades  $\beta$ -D-glicose ligadas nas posições 1 e 4. A estrutura química da cadeia principal é idêntica à da celulose. As cadeias laterais do trissacarídeo contêm uma unidade de ácido D-glucurônico entre duas unidades de D-manose ligadas na posição O-3 de todos os outros resíduos de glicose na cadeia principal. Aproximadamente metade do terminal D-manose contém um resíduo de ácido pirúvico ligado via grupo keto às 4 e 6 posições, com uma distribuição desconhecida. A unidade D-manose ligada à cadeia principal contém um

grupo acetil na posição O-6. A presença de ácidos acético e pirúvico produz um tipo de polissacarídeo aniônico (SANDFORD; BAIRD, 1983).

Foi demonstrado que a estrutura secundária da goma xantana consiste em uma estrutura helicoidal quártupla. A molécula de goma xantana passa por uma transição conformacional de ordem induzida termicamente. A forma desordenada é favorecida por baixas concentrações de sal e altas temperaturas, enquanto o sal estabiliza a conformação ordenada. A maioria das publicações dão evidência de que a conformação ordenada de xantana é de dupla corda ou dimérica (KATZBAUER, 1998).

Figura 2.4 – Estrutura Molecular da Goma Xantana



Fonte: SANDFORD; BAIRD (1983).

A composição percentual média de polissacarídeos produzidos pela bactéria *Xanthomonas campestris* pv. *campestris* segundo KENNEDY; BRADSHAW (1984) é 30,1% de D-Glucose, 27,3% de D-Manose, 14,9% de Ácido D-Glucurônico, 7,1% de Piruvato e 6,5% de Acetato

## 2.11. Propriedades

Soluções de xantanas obtidas por dissolução em meio aquoso a temperaturas moderadas tendem a ser altamente viscosas. A temperatura de dissolução afeta muito a viscosidade ao controlar a conformação molecular e a aparência de estruturas ordenadas. A molécula de xantana parece ter duas conformações, hélice e bobina aleatória, dependendo da temperatura de dissolução (MORRIS, 1977; HORTON et al., 1985; GARCÍA-OCHOA; CASAS, 1994)

Uma das características marcantes das propriedades da solução da goma xantana é um valor de rendimento bem definido. Esta característica distingue a goma xantana de outros polissacarídeos comerciais. Um “valor de rendimento de trabalho” pode ser definido como uma

tensão de cisalhamento necessária para produzir uma taxa de cisalhamento de  $0,01 \text{ segundos}^{-1}$ . Com uma tração concêntrica de 0,75%, o “valor de rendimento de trabalho” da goma xantana é  $1,5 \text{ Nm}^{-2}$  em água deionizada e  $5,2 \text{ Nm}^{-2}$  na presença de eletrólitos. O "trabalho valor de rendimento" relaciona-se bem com a eficácia de um polímero na estabilização de emulsões e suspensões contra a separação. (PETTITT, 1979)

A goma xantana é altamente solúvel em água fria e quente, e este comportamento está relacionado com a natureza polieletrólita da molécula xantana. As soluções xantanas são altamente viscosas mesmo em baixas concentrações de polímeros. A capacidade de espessamento das soluções xantanas está relacionada com a viscosidade. As soluções xantanas são pseudoplásticas, ou seja, a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de cisalhamento. A viscosidade também depende da temperatura (tanto de dissolução como de medição), da concentração de biopolímeros, da concentração de sais e do pH. Outras propriedades típicas da goma xantana são dadas na Tabela 2.1. (GARCÍA-OCHOA et al., 2000)

Tabela 2.1 – Propriedades típicas da goma xantana

Propriedades	Valor
Estado Físico	Pó seco, de cor creme
Umidade (%)	8–15
Cinzas (%)	7–12
Nitrogênio (%)	0,3–1
Teor de acetato (%)	1,9–6,0
Conteúdo piruvato (%)	1,0–5,7
Sais monovalentes ( $\text{g.L}^{-1}$ )	3,6–14,3
Sais divalentes ( $\text{g.L}^{-1}$ )	0,085–0,17
Viscosidade (cP)	13–35

Fonte: GARCÍA-OCHOA et al. (2000)

## 2.12. Influência da Temperatura

A viscosidade da solução depende da temperatura de dissolução do polímero; a viscosidade diminui com o aumento da temperatura de dissolução até  $40^\circ\text{C}$ . Entre  $40$  e  $60^\circ\text{C}$ , a viscosidade aumenta com o aumento da temperatura. Para temperaturas  $>60^\circ\text{C}$ , a viscosidade diminui à medida que a temperatura é levantada. Este comportamento está associado a mudanças conformacionais da molécula xantana. A conformação passa de um estado ordenado (baixa temperatura de dissolução) para um estado desordenado (alta temperatura de dissolução) (MORRIS, 1977; MILAS; RINAUDO, 1979; GARCÍA-OCHOA; CASAS, 1994).

A temperatura de transição pode variar dependendo da concentração de sal, independentemente da concentração de polímeros (MILAS; RINAUDO, 1979).

### **2.13. Influência da Concentração de Polímeros e Sal**

A viscosidade das soluções de xantana aumenta substancialmente com o aumento da concentração do polímero. Este comportamento é atribuído à interação intermolecular ou emaranhamento, aumentando as dimensões eficazes da macromolécula e o peso molecular. A presença de sais em solução influencia a viscosidade xantana. Com baixa concentração de polímeros, a viscosidade diminui ligeiramente quando uma pequena quantidade de sal é adicionada à solução. Este efeito tem sido atribuído à redução nas dimensões moleculares resultante da diminuição das forças eletrostáticas intermoleculares (SMITH; PACE, 1982). A viscosidade aumenta com maior concentração de xantanas ou quando uma grande quantidade de sal é adicionada. Este efeito é provavelmente devido ao aumento da interação entre as moléculas poliméricas (SMITH; PACE, 1982; MILAS; RINAUDO; TINLAND, 1985). A viscosidade de uma solução xantana é independente da concentração de sal quando o teor de sal excede 0,1% p/v (KANG; PETTITT, 1993).

### **2.14. Comportamento Pseudoplástico**

As soluções Xanthan têm uma reologia não-Newtoniana. A viscosidade aparente diminui conforme aumenta a taxa de cisalhamento. (KANG; PETTITT, 1993). Entretanto, as soluções xantanas exibem uma tensão inicial de rendimento que deve ser superada para que a solução flua. O *stress* de rendimento confere estabilidade às emulsões em situações de baixo stress durante o armazenamento ou transporte quando o stress predominante é menor que o stress de rendimento (MA; BARBOSA-CANOVAS, 1995).

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1. Materiais**

Neste trabalho foram estudados dois efeitos de variáveis que influenciam nas propriedades reológicas da goma xantana. Foi avaliada a variação da viscosidade aparente sob as mudanças de concentração de goma xantana na mistura a temperatura constante e sob as mudanças de temperatura na mistura a concentração de goma xantana constante.

Para isso utilizou-se o espessante/estabilizante goma, fabricado por Saporiti Di Brasil Ltda. A substância já vem no estado sólido e em pó, já preparada para a mistura. Na mesma, foi utilizado também água destilada para realizar a mistura do fluido pseudoplástico.

Os experimentos foram realizados em um laboratório localizado nas dependências da Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia - FACET da Universidade Federal da Grande Dourados.

Figura 3.1 – Goma xantana utilizada



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Os equipamentos utilizados para os experimentos citados foram:

- Uma balança digital de precisão Analyser,
- Um balão Volumétrico de 500 ml
- Quatro béqueres de polipropileno com volume de 1000ml,
- Um Agitador Mecânico Fisatom 715 de até 2500 rpm
- Um Banho Térmico com circulação TC-550 da Brookfield
- Um Viscosímetro Brookfield DV-II+ Pro
- Um *Spindle* Brookfield SC4-31

Figura 3.2 – Balança digital de precisão



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Figura 3.3 – Agitador Mecânico Fisatom



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Figura 3.4 – Banho Térmico com circulação TC-550 da Brookfield



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Figura 3.5 – Viscosímetro Brookfield DV-II+ Pro



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Figura 3.6 – Spindle Brookfield SC4-31



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

### 3.2. Preparo das Misturas

Para a análise da influência das concentrações foram preparadas três soluções, nas concentrações de 0,2%, 0,3% e 0,4% m/m de goma xantana cada uma das misturas. Para a análise da influência de temperatura foi produzida uma solução com a concentração de 0,3% m/m de goma xantana.

Para a preparação das soluções de goma xantana, foram feitos cálculos de proporcionalidade para cada concentração, os mesmos são apresentados na Tabela 3.1:

Tabela 3.1 – Relação de Materiais Para o Preparo das Soluções de Goma Xantana

Componente	GX 0,2 % m/m	GX 0,3 % m/m	GX 0,4 % m/m
Água destilada	500 ml	500 ml	500 ml
Goma Xantana	1,0 g	1,5 g	2,0 g

Para promover a dispersão da goma xantana em meio aquoso, foi utilizado o agitador mecânico Fisatom 715. A adição do polímero era realizada lentamente (para evitar a formação de flocos) e sob a agitação que era gradativamente aumentada de 500 até 2000 rpm. Após a completa adição do material, a solução foi mantida sob agitação constante por um intervalo de 10 minutos para garantir uma completa dissolução. Por fim, o recipiente foi vedado e deixado em repouso por 5 horas para a hidratação do polímero e a consequente estabilidade da viscosidade aparente da solução

### 3.3. Preparações para os ensaios

O primeiro passo para iniciar a fase experimental foi a inicialização e configuração de cada componente, tendo em vista que o banho térmico teria que aquecer até a temperatura programada e que seria necessário regular o viscosímetro para a realização do ensaio.

Enquanto o banho térmico alcança os 25 °C para a análise da influência de concentração e 24 °C para a de temperatura, foi avaliado o spindle a ser utilizado para a análise. Cada spindle possui uma faixa de deformação diferente e, em função da solicitação do experimento, optou-se pelo *spindle* Brookfield SC4-31. Já com o software de análise iniciado (Rheocalc), foi necessário zerar a posição do viscosímetro, sem o spindle.

Com uma proveta, a solução de goma xantana preparada foi adicionada ao copo de teste e acoplado ao viscosímetro. O banho está conectado ao suporte do copo, o qual circula água a temperatura programada, fornecendo calor a mistura.

Agora, com o spindle no viscosímetro, aguarda-se 5 minutos para que a mistura fique com uma temperatura homogênea, para assim iniciar a primeira análise.

### 3.4. Ensaio no viscosímetro

Ao término do período de preparação iniciou-se a programação do reômetro Rheocalc, com as condições de contorno necessárias.

Na interface de programação do Rheocalc, foi configurado para o tipo de teste speed ramp, no qual o programa toma os dados de viscosidade através de velocidades diferentes. Foi programado uma resposta de 10 velocidades diferentes, de 2 a 15, mantendo a mesma por 30 segundos.

Na configuração de coleta de dados, foi definido um total de 15 pontos a cada 30 segundos. Tendo em vista que é uma medida esperada e não definitiva.

Para que fosse observado o comportamento da viscosidade com a variação de concentração, este processo foi repetido nas soluções GX 0,2% m/m, GX 0,3% m/m e GX 0,4% m/m. Já para que fosse observado o comportamento da viscosidade com a variação da temperatura, esse processo foi repetido nas temperaturas de 24°C, 34°C e 44°C.

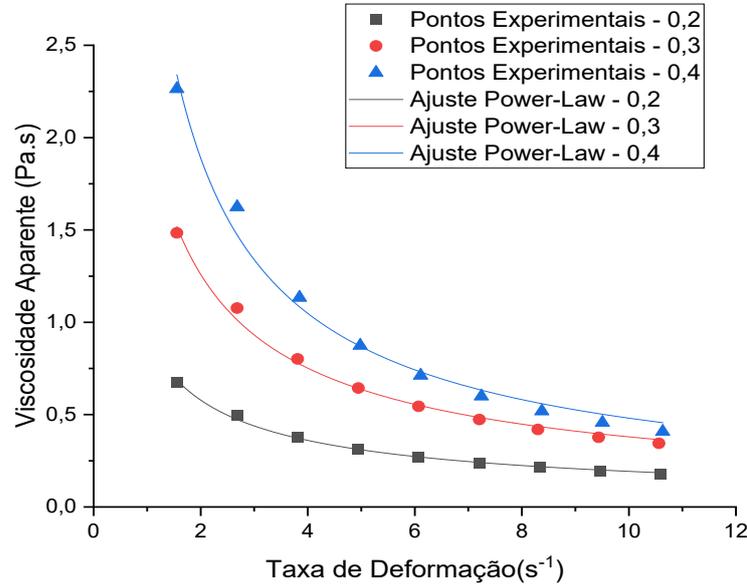
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. Análise das propriedades reológicas sob as mudanças de concentração

Os resultados da variação da viscosidade aparente em função da taxa de deformação, para as soluções de goma xantana, nas concentrações de 0,2% m/m, 0,3% m/m e 0,4% m/m,

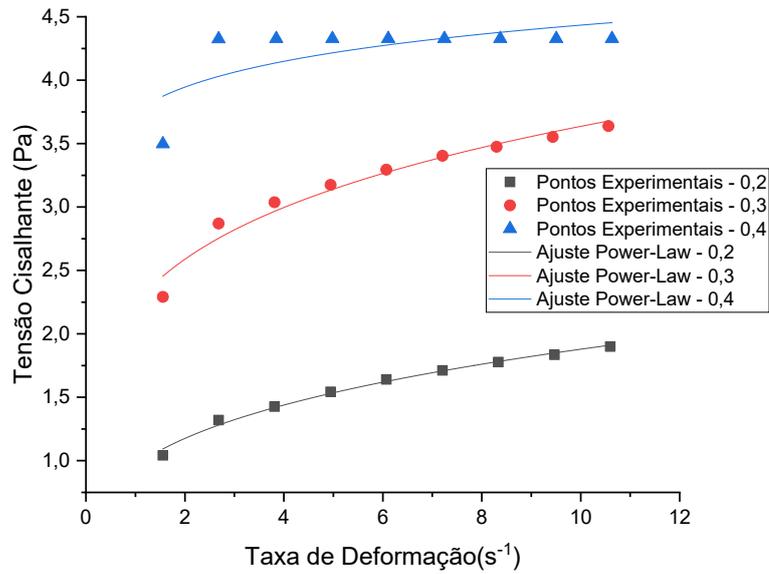
estão apresentadas na Figura 4.1. Na Figura 4.2, tem-se o a curva de escoamento, ou seja, a tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para as três concentrações estudadas.

Figura 4.1 – Diagrama de Viscosidade para soluções de goma xantana em diferentes concentrações.



Na Figura 4.1 é possível observar a redução da viscosidade aparente como o aumento da taxa de deformação para todas as concentrações, ou seja, a goma xantana apresentou comportamento pseudoplástico para as três soluções estudadas. Observa-se também uma maior redução nos valores da viscosidade aparente para concentrações menores. A mistura de maior concentração, 0,4%, tem uma queda de viscosidade aparente mais acentuada que as outras soluções menos concentradas, em condições de menores taxas de deformação. No entanto, verifica-se uma tendência de estabilização da viscosidade em condições de maiores taxas de deformação. Já a mistura de 0,2%, teve uma menor variação na viscosidade aparente em condições de menores taxas de deformação, quando comparada com as soluções mais concentradas. Tais resultados indicam maior grau de pseudoplasticidade para as soluções mais concentradas.

Figura 4.2 – Reograma (Variação de Concentração)



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Na Figura 4.2 pode-se observar que a tensão cisalhante é proporcional a concentração, ou seja, quanto maior for a concentração da mistura, maior será a sua tensão cisalhante, tendo uma tensão cisalhante menor quando a concentração do polímero era de 0,2% m/m e maior quando 0,4% m/m.

A aplicação do ajuste de Power-law (Equação 2.6), permitiu que a visualização do comportamento das propriedades reológicas fosse apresentada com mais clareza.

$$\eta = m(\dot{\gamma}_{yx})^{n-1}$$

Com o ajuste também se tornou possível encontrar, empiricamente, o índice de consistência e o índice de comportamento do fluido, os quais, estão presentes na Tabelas 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros da Equação Power-law (Variação de Concentração)

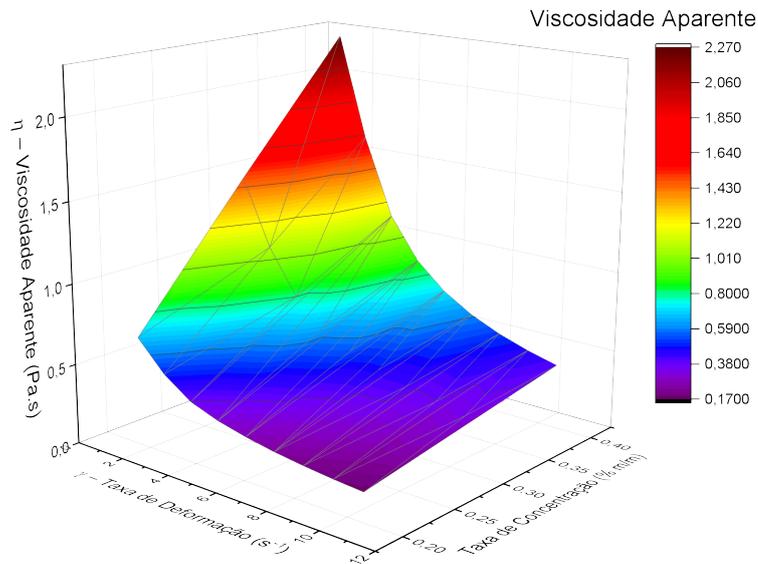
	$m [Pa \cdot s^n]$	$n$ [adimensional]	$R^2$
<b>GX 0,2% m/m</b>	0,929	0,317	0,997
<b>GX 0,3% m/m</b>	2,112	0,255	0,994
<b>GX 0,4% m/m</b>	3,408	0,149	0,988

Verifica-se na Tabela 4.1, que os menores valores do índice de comportamento do fluido (n) estavam associados as maiores concentrações de polímero. Este fato, indica que o aumento da concentração de goma xantana na solução, aumentou o grau de pseudoplasticidade da solução. Sabe-se que quanto mais próximo de zero for o valor de n, mais pseudoplástico é o fluido, para o valor de n=1, tem-se um fluido newtoniano.

Observa-se também na Tabela 4.1, que o índice de consistência ( $m$ ), aumentou com o aumento da concentração de xantana. Esta observação indica que, conforme esperado, o aumento da concentração de polímero, ocorreu o aumento da viscosidade aparente da solução.

Para uma melhor visualização da influência da concentração de polímero e da taxa de deformação na viscosidade aparente do fluido, foi plotado tais resultados em um gráfico 3D, como pode ser visto na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Viscosidade Aparente em Função da Taxa de Deformação e da Concentração



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

A equação matemática que descreve as relações de viscosidade aparente em função da taxa de deformação e a concentração de polímero, pode ser obtida ao analisar a equação Oswald-de-Waele. Em tal expressão, foi verificado que o índice de comportamento do fluido e o índice de consistência do fluido,  $n$  e  $m$  respectivamente, tiveram seus valores alterados quando a concentração da solução era alterada. Assim, para diferentes concentrações de goma xantana, espera-se que os valores de  $m$  e  $n$  variem, refletindo a alteração da viscosidade da solução. Isso pode ser expresso pela equação:

$$m = f(C)$$

$$n = g(C)$$

Onde:

- $C$  é a concentração de goma xantana na solução;
- $f(C)$  e  $g(C)$  são funções que descrevem a variação de  $m$  e  $n$  em relação a  $C$ , respectivamente.

Então foi usado os valores de  $m$  e  $C$  já obtidos para encontrar uma equação que descreva a relação entre eles. Para isso foi usado uma equação polinomial de segundo grau, que pode ser escrita como:

$$m = aC^2 + bC + c \quad (4.1)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes a serem determinadas.

Juntando essa equação com os valores, tem-se às seguintes equações:

$$0,929 = a(0,2)^2 + b(0,2) + c$$

$$2,112 = a(0,3)^2 + b(0,3) + c$$

$$3,408 = a(0,4)^2 + b(0,4) + c$$

Utilizando o método de substituição chega-se nos seguintes valores:

$$a = 5,61 \quad b = 8,90 \quad c = -1,09$$

Substituindo os valores das constantes na Equação 4.1, tem-se:

$$m = 5,61C^2 + 8,90C - 1,09 \quad (4.2)$$

Foi feito o mesmo processo para obter a equação de  $n$ , resultando em:

$$n = aC^2 + bC + c \quad (4.3)$$

$$0,317 = a(0,2)^2 + b(0,2) + c$$

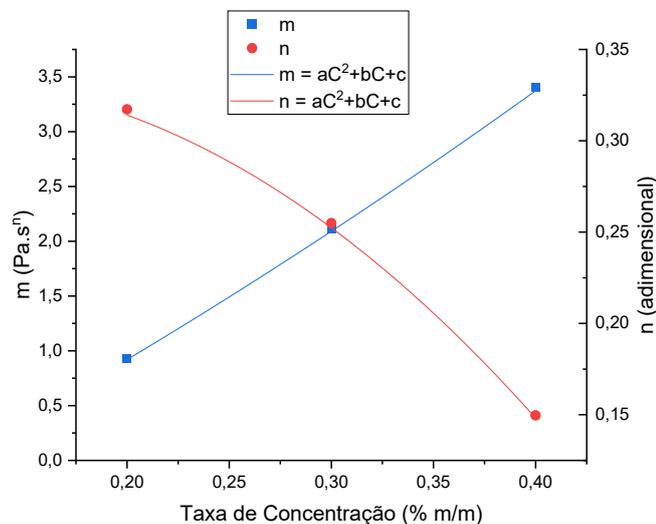
$$0,255 = a(0,3)^2 + b(0,4) + c$$

$$0,149 = a(0,4)^2 + b(0,3) + c$$

$$n = -2,13C^2 + 0,45C + 0,31 \quad (4.4)$$

Com essas equações foi plotado um gráfico afim de visualizar suas curvas de acordo com a concentração.

Figura 4.4 – Comportamento dos Parâmetros em Função da Taxa de Concentração



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Substituindo as Equações 4.2 e 4.4 na Equação 2.6:

$$\eta = m(\dot{\gamma})^{n-1}$$

$$\eta = (5,61C^2 + 8,90C - 1,09)(\dot{\gamma})^{(-2,13C^2+0,45C+0,31)-1} \quad (4.5)$$

A Equação 4.5 mostra a relação da viscosidade aparente em função da concentração de goma xantana e da taxa de deformação. Tal relação pode ser bastante útil para modelagem de escoamento de fluidos a base de goma xantana (como ocorre em lamas de perfuração), para situações envolvendo diferentes concentrações do polímero.

Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), estão dentro do desejável, ou seja, em uma concordância aceitável em relação aos dados reais.

Tabela 4.2 – Coeficiente de determinação da função da taxa de concentração

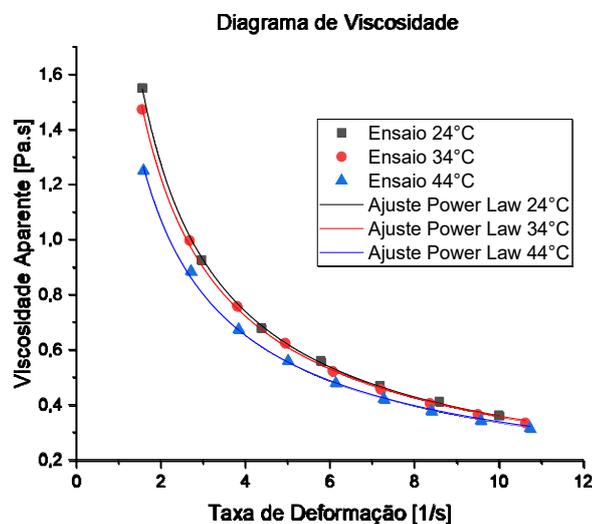
	m [Pa·s <sup>n</sup> ]	n [adimensional]
$R^2$	0,999	0,998

#### 4.2. Análise das propriedades reológicas sob as mudanças de temperatura

Dessa forma, ao findar dos ensaios de viscosidade do fluido não-newtoniano, foram obtidos resultados do comportamento da viscosidade aparente e da tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação para cada temperatura estudada (24°C, 34°C e 44°C).

Com o intuito de comparação, os dados obtidos foram plotados em cada temperatura, tanto em um diagrama de viscosidade (viscosidade aparente em função da taxa de deformação) quanto em um reograma (tensão de cisalhamento em função da taxa de deformação), para que a visualização do comportamento seja mais visível. Os resultados estão dispostos nas Figuras 4.5 e 4.6.

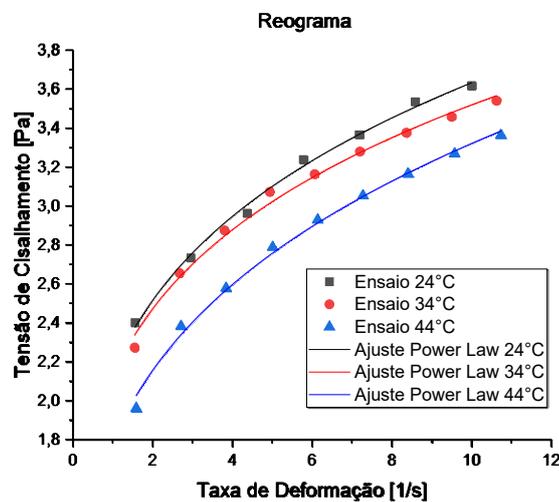
Figura 4.5 – Diagrama de Viscosidade (Variação de Temperatura)



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Observa-se na Figura 4.5 que as soluções apresentaram comportamento pseudoplástico para todas as temperaturas estudadas, ou seja, houve redução da viscosidade aparente com o aumento da taxa de deformação para a três temperaturas analisadas. É possível verificar também, um crescimento nos valores da viscosidade aparente para temperaturas mais baixas, no caso, essa observação é melhor observada na diferença dos valores de viscosidade aparente de 24°C e 44°C. No entanto, verifica-se que este aumento não é constante. Observa-se um considerável aumento na viscosidade na faixa de temperaturas de 44°C para 34°C, enquanto, de 34°C para 24°C este aumento foi bem menos expressivo. Tais resultados indicam uma tendência de estabilização da viscosidade com a temperatura por volta dos 30°C.

Figura 4.6 – Reograma (Variação de Temperatura)



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Pelo reograma, também pode-se observar que a tensão de cisalhamento é inversamente proporcional ao aumento da temperatura, ou seja, quando a temperatura aumenta, a tensão de cisalhamento diminui.

A aplicação do ajuste de power-law, permitiu que a visualização do comportamento das propriedades reológicas fosse apresentada com mais clareza, podendo chegar à conclusão citada anteriormente, as propriedades reológicas da goma xantana são inversamente proporcionais ao aumento da temperatura.

Com o ajuste também se tornou possível encontrar, empiricamente, o índice de consistência e o índice de comportamento do fluido, os quais, estão presentes na Tabela 4.3 abaixo.

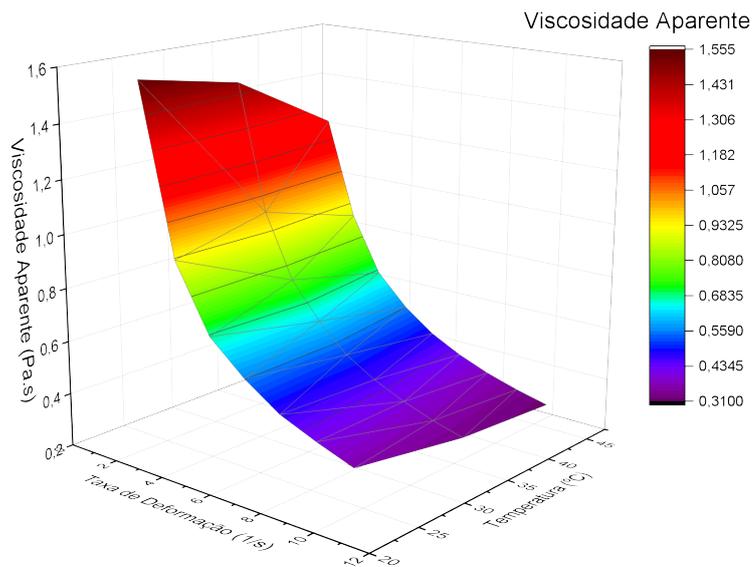
Tabela 4.3. Parâmetros da Equação Power-law (Variação de Temperatura)

	$m [Pa \cdot s^n]$	$n$ [adimensional]	$R^2$
24°C	2,201	0,213	0,999
34°C	2,079	0,237	0,999
44°C	1,765	0,282	0,998

Quanto menor for  $n$ , maior será o grau de plasticidade do fluido, portanto, quanto maior a temperatura, menos pseudoplástico o fluido se torna. Também, pode-se observar, que os dados empíricos trouxeram valores de  $m$  e  $n$  muito próximos do diagrama de viscosidade em comparação com o reograma, assim como é dito na literatura, tendo erros de  $m$  em  $\pm 0,03$  e  $n$   $\pm 0,007$ .

Para uma melhor visualização da influência da temperatura e da taxa de deformação na viscosidade aparente, na Figura 4.7, tem-se tais propriedades plotadas em um gráfico 3D.

Figura 4.7 – Viscosidade Aparente em Função da Taxa de Deformação e da Temperatura



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

A equação matemática que descreve as relações de viscosidade aparente em função da taxa de deformação e da temperatura pode ser obtida ao analisar a equação Power-law. Foi observado que o índice de comportamento do fluido ( $n$ ) e o índice de consistência ( $m$ ) do fluido tiveram seus valores alterados com a variação de temperatura. E isso pode ser expresso pela equação:

$$m = f(T)$$

$$n = g(T)$$

Onde:

- $T$  é a temperatura na qual o fluido sofreu a taxa de cisalhamento;
- $f(T)$  e  $g(T)$  são funções que descrevem a variação de  $m$  e  $n$  em relação a  $T$ , respectivamente.

Então foi usado os valores de  $m$  e  $T$  já obtidos para encontrar uma equação que descreva a relação entre eles. Para isso foi usado uma equação polinomial de segundo grau, que pode ser escrita como:

$$m = aT^2 + bT + c \quad (4.6)$$

Onde  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes a serem determinadas.

Juntando essa equação com os valores, tem-se às seguintes equações:

$$2,201 = a(24)^2 + b(24) + c$$

$$2,079 = a(34)^2 + b(34) + c$$

$$1,765 = a(44)^2 + b(44) + c$$

Utilizando o método de substituição chega-se nos seguintes valores:

$$a = -0,00096 \quad b = 0,044 \quad c = 1,683$$

Substituindo os valores das constantes na Equação 4.6, tem-se:

$$m = -0,00096T^2 + 0,044T + 1,683 \quad (4.7)$$

Foi feito o mesmo processo para obter a equação de  $n$ , resultando em:

$$n = aT^2 + bT + c \quad (4.8)$$

$$0,213 = a(24)^2 + b(24) + c$$

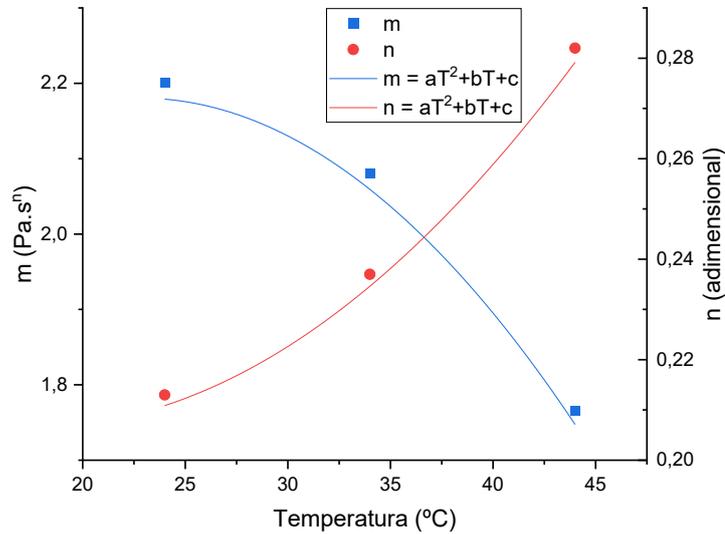
$$0,237 = a(34)^2 + b(34) + c$$

$$0,282 = a(44)^2 + b(44) + c$$

$$n = 0,0001T^2 - 0,0037T + 0,2387 \quad (4.9)$$

Com essas equações foi plotado um gráfico afim de visualizar suas curvas de acordo com a temperatura.

Figura 4.8 – Comportamento dos Parâmetros em Função da Variação de Temperatura



Fonte: elaborado pelos autores (2023)

Substituindo as Equações 4.7 e 4.9 na Equação 2.6 (Power-law):

$$\eta = m(\gamma)^{n-1}$$

$$\eta = (-0,00096T^2 + 0,044T + 1,683)(\gamma)^{(0,0001T^2 - 0,0037T + 0,2387) - 1} \quad (4.10)$$

Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), estão dentro do desejável, ou seja, em uma concordância aceitável em relação aos dados reais. Tal constatação indica o bom ajuste da equação proposta por este trabalho.

Tabela 4.4 – Coeficiente de determinação da função da temperatura.

	m [Pa·s <sup>n</sup> ]	n [adimensional]
$R^2$	0,988	0,993

A Equação 4.10 mostra a relação da viscosidade aparente em função da temperatura da solução e da taxa de deformação. Tal relação pode ser bastante útil para modelagem de fenômenos de escoamento de fluidos a base de goma xantana (como ocorre em lamelas de perfuração), para situações envolvendo diferentes temperaturas.

## 5. CONCLUSÃO

As soluções de goma xantana apresentaram comportamento pseudoplástico em todas as temperaturas (24°C, 34°C e 44°C) e concentrações (0,2%, 0,3%, 0,4%) estudadas.

Os resultados indicaram que a variação de temperatura e a variação de concentração de polímero influenciaram substancialmente tanto na viscosidade aparente do fluido, quanto no grau de pseudoplasticidade do mesmo.

O aumento da temperatura reduziu a viscosidade aparente do fluido. No entanto, essa redução não foi linear. No crescimento de temperatura de 34°C para 44°C foi observado maior redução de viscosidade do que quando comparada com a redução de 24°C para 34°C. A partir da análise do índice de comportamento do fluido ( $n$ ), foi observado que o aumento da temperatura do fluido, reduziu a pseudoplasticidade do mesmo.

O aumento de concentração de polímero aumentou a viscosidade aparente do fluido, e a pseudoplasticidade do mesmo, como analisado pelo índice de comportamento do fluido ( $n$ ).

O aumento da concentração de goma xantana, não aumentou a viscosidade de forma diretamente proporcional, principalmente para as soluções mais concentradas, em que foi verificada a proximidade da viscosidade aparente em condições de elevadas taxas de deformação.

### 5.1. Sugestões para Trabalhos Futuros

A disponibilidade de instrumentos necessários para a realização de alguns experimentos foi uma dificuldade enfrentada na realização dos ensaios, pois, a demanda para os mesmos era alta.

Em função disso, recomenda-se para trabalhos futuros a realização de ensaio, utilizando os mesmos aparelhos, com a variação de temperatura continua durante a realização do ensaio no viscosímetro, a fim de demonstrar o comportamento do fluido a um crescimento continuo da temperatura, simulação com mais fidelidade uma condição real.

O comportamento tixotrópico da mistura também é um tema sugerido, o qual não foi explorado nesse trabalho, o qual, traria grande acréscimo ao estudo, sendo possível visualizar o comportamento da viscosidade aparente em processos de deformação continuo por um período de tempo determinado.

A comprovação dos dados aqui apresentados utilizando softwares de análises computacionais fluidodinâmicas é um ponto de estudo muito importante, gerando uma visão qualitativa dos ensaios.

Por último, durante a revisão bibliográfica foi citado a característica de alteração das propriedades do fluido exposto a diferentes temperaturas durante o preparo da mistura, o qual poderia apresentar qualidades benéficas ou não para a aplicação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Fenômenos De Transporte**. 2. ed. Rio De Janeiro: Livros Técnicos E Científicos, 2004.

BRADBURY, J. F. Genus II. Xanthomonas Dowson 1939, 187. In: KRIEG, N. R.; HOLT, J. C. (Eds.). **Bergey's manual of determinative bacteriology**. Baltimore: Williams and Wilkins Co., 1984. p. 199–210.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. [s.l.] AMGH Editora Ltda., 2007.

CHHABRA, R. P. **Bubbles, drops, and Particles in non-Newtonian Fluids**. 2. ed. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 2007.

CHHABRA, R. P. Non-newtonian fluids: an Introduction. In: MURALI, K. J.; DESHPANDE, A. P.; KUMAR, (Eds.). **Rheology of Complex Fluids**. [s.l.] Springer New York, 2010. p. 3–34.

CHHABRA, R. P.; RICHARDSON, J. F. **Non-Newtonian Flow and Applied Rheology**. [s.l.] Elsevier, 2011.

COIMBRA, A. L. **Mecânica Dos Fluidos**. 1. ed. Rio de Janeiro: E-papers, 2015.

GARCÍA-OCHOA, F.; CASAS, J. A. Apparent yield stress in xanthan gum solutions at low concentrations. **The Chemical Engineering Journal and the Biochemical Engineering Journal**, v. 53, p. B41–B46, 1994.

GARCÍA-OCHOA, F. et al. Xanthan gum: production, recovery, and properties. **Biotechnology Advances**, v. 18, p. 549–579, 2000.

GAUTO, M. A. et al. **Petróleo E Gás: Princípios De Exploração, Produção E Refino**. [s.l.] Bookman Editora, 2016.

HORTON, D. et al. Structural and biosynthetic studies on xanthan by <sup>13</sup>C-n.m.r. spectroscopy. **Carbohydrate Research**, v. 141, p. 340–346, 1985.

KANG, K. S.; PETTITT, D. J. CHAPTER 13 - XANTHAN, GELLAN, WELAN, AND RHAMSAN. In: WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N. (Eds.). **Industrial Gums**. Third Edition ed. [s.l.] Academic Press, 1993. p. 341–397.

KATZBAUER, B. Properties and applications of xanthan gum. **Polymer Degradation and Stability**, v. 59, p. 81–84, 1998.

KENNEDY, J. F.; BRADSHAW, I. J. Production, properties and applications of Xanthan. **Progress in Industrial Microbiology**, v. 19, p. 319–371, 1984.

MA, L.; BARBOSA-CANOVAS, G. V. Instrumentation for the rheological characterization of foods. **Food Science and Technology International**, v. 1, p. 3–17, 1995.

MILAS, M.; RINAUDO, M. Conformational investigation on the bacterial polysaccharide xanthan. **Carbohydrate Research**, v. 76, p. 189–196, 1979.

MILAS, M.; RINAUDO, M.; TINLAND, B. The viscosity dependence on concentration, molecular weight and shear rate of xanthan solutions. **Polymer Bulletin**, v. 14, n. 2, p. 157–164, 1985.

MOREIRA, B. A. **Estudo Da Sedimentação Em Suspensões De Fluidos Com Características Reológicas Pseudoplásticas**. Tese de Doutorado—Universidade Federal de Uberlândia: [s.n.].

MOREIRA, B. A.; AROUCA, F.; DAMASCENO, J. **Fluidos não-newtonianos: definições e metodologias de caracterização**. 2. ed. Uberlândia: Edibrás, 2018.

MORRIS, E. R. Molecular Origin of Xanthan Solution Properties. In: SANDFORD, P. A.; LASKIN, A. (Eds.). **Extracellular Microbial Polysaccharides**. [s.l.] American Chemical Society, 1977. v. 45p. 81–89.

PALANIRAJ, A.; JAYARAMAN, V. Production, recovery and applications of xanthan gum by *Xanthomonas campestris*. **Journal of Food Engineering**, v. 106, p. 1–12, 2011.

PETTITT, D. J. 17 - XANTHAN GUM. In: BLANSHARD, J. M. V.; MITCHELL, J. R. (Eds.). **Polysaccharides in Food**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 1979. p. 263–282.

SANDFORD, P. A.; BAIRD, J. Industrial Utilization of Polysaccharides. In: ASPINALL, G. O. (Ed.). **The Polysaccharides**. [s.l.] Academic Press, 1983. p. 411–490.

SMITH, I. H.; PACE, G. W. Recovery of microbial polysaccharides. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 32, p. 119–129, 1982.

SOCHI, T. Flow of non-newtonian Fluids in Porous Media. **Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics**, v. 48, p. 2437–2767, 2010.

THOMAS, J. E. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2021.