



Gabriel da Cunha Elias

**Estudo da Tribologia com Fluidos Não
Newtonianos Aplicado Para a Indústria do
Petróleo**

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientador : Prof. Mônica F. Naccache
Coorientador: Priscilla R. Varges

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2025

Agradecimentos

Gostaria de agradecer profundamente a amigos e família pelo apoio durante toda a minha vida acadêmica, principalmente à minha mãe Tamara e ao meu pai Jáдино. Esse apoio tem sido a minha base emocional e incentivo primordial na minha vida.

Agradeço à Priscilla e à Monica por todos os ensinamentos e pela disponibilidade da infraestrutura do GREO durante os dois anos dessa jornada acadêmica, incluindo a Iniciação Científica e o Trabalho de Conclusão de Curso.

Agradeço ao PIBIC pelo incentivo durante a Iniciação Científica que serviu de base para o início do projeto final.

Agradeço ao apoio diário de todos os pesquisadores e doutorandos do GREO durante a pesquisa realizada.

Agradeço a PUC-Rio e a todos os meus professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelos ensinamentos e colaboração durante esses anos na faculdade.

Sou grato a Deus por todas as oportunidades que tenho recebido.

Resumo

Elias, Gabriel da Cunha; Naccache, Mônica F.; Varges, Priscilla R.. **Estudo da Tribologia com Fluidos Não Newtonianos Aplicado Para a Indústria do Petróleo**. Rio de Janeiro, 2025. 71p. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A tribo-reologia combina os princípios das ciências de reologia e tribologia, aplicando técnicas reométricas para avaliar propriedades de fricção, desgaste e lubrificação de materiais em condições de contato e movimento relativo. Na indústria do petróleo, essa interdisciplinaridade se destaca como uma abordagem inovadora para otimizar a formulação de fluidos de perfuração que contenham nanopartículas e outros aditivos.

Embora a tribo-reometria, técnica utilizada para tais medições, ainda seja pouco difundida, este estudo busca desenvolver e expandir sua aplicação metodológica. Durante a pesquisa, é realizada uma análise qualitativa tribo-reológica de fluidos de perfuração, considerando a maior variabilidade condicional de testes. O objetivo é avaliar as características de lubrificação desses fluidos em diferentes cenários, fundamentando-se nos princípios da teoria da lubrificação, utilizando-se também de uma avaliação microestrutural complementar.

Palavras-chave

Tribologia, Reologia, Tribo-reologia, Nanomateriais, Perfuração

Abstract

Elias, Gabriel da Cunha; Naccache, Mônica F. (Advisor); Varges, Priscilla R. (Co-Advisor). **Study of Tribology with Non Newtonian Fluids Applied to the Oil and Gas Industry**. Rio de Janeiro, 2025. 71p. Undergraduation Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Tribo-rheology combines the principles of rheology and tribology, applying rheometric techniques to evaluate the friction, wear, and lubrication properties of materials under conditions of contact and relative motion. In the oil and gas industry, this interdisciplinary approach stands out as an innovative method for optimizing the formulation of drilling fluids containing nanoparticles and other additives.

Although tribo-rheometry, the technique used for such measurements, is still not widely adopted, this study aims to develop and expand its methodological application. During the research, a qualitative tribo-rheological analysis of drilling fluids is conducted, considering the widest possible range of test conditions. The objective is to evaluate the lubrication characteristics of these fluids in various scenarios, grounded in the principles of lubrication theory, while also incorporating a complementary microstructural evaluation.

Keywords

Tribology; Rheology; Tribo-rheology; Nanomaterials; Drilling

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
2	Revisão teórica	12
2.1	Tribologia	12
2.1.1	Região limite	15
2.1.2	Região mista	15
2.1.3	Região hidrodinâmica	16
2.2	Fluidos não newtonianos e reologia	16
2.3	Tribo-reometria	17
2.3.1	Parâmetros variados	17
2.3.1.1	Características mecânicas das superfícies de interface	17
2.3.1.2	Temperatura	17
2.3.1.3	Força normal	18
2.3.1.4	Velocidade de deslizamento	18
2.3.2	Master curve	18
2.4	Aplicações	18
2.4.1	Aplicação da reologia e tribologia com fluidos de perfuração	19
3	Materiais e Método Experimental	21
3.1	Instrumentos utilizados	21
3.1.1	Reômetro rotacional híbrido	21
3.1.2	Microscópio óptico	24
3.1.3	Lavadora ultrassônica compacta	25
3.1.4	Microscópio eletrônico de varredura	26
3.1.5	Placa de <i>Peltier</i>	27
3.1.6	Geometria superior	28
3.1.7	Geometria Inferior	30
3.2	Materiais utilizados para a geometria inferior	30
3.2.1	Alumínio anodizado e alumínio aeronáutico	31
3.2.2	Resina	31
3.2.3	Acetal	31
3.2.4	Nylon	31
3.3	Fluidos utilizados	31
3.4	Metodologia	33
3.4.1	Rotina de calibração diária	33
3.4.2	A calibração do <i>gap</i>	34
3.4.3	Inserção da amostra	34
3.4.4	Limpeza externa da amostra	34
3.5	Dinâmica do experimento	36
3.5.1	Curva de <i>Stribeck</i>	38
3.5.2	<i>Steps</i> de forças normais com velocidade fixa	38
4	Resultados	40

4.1	Primeira sessão de testes	40
4.1.1	Curva de <i>Stribeck</i> demonstração de 3N	40
4.1.2	Curva de <i>Stribeck</i> de 1N	42
4.1.3	Curvas de <i>Stribeck</i> 5N e 7N decrescente	43
4.1.4	Curvas de <i>Stribeck</i> 10N crescente e decrescente	45
4.1.5	Curvas de <i>Stribeck</i> com 12N, 15N e 18N	47
4.1.6	Gráfico combinando todas as forças axiais	49
4.1.7	<i>Step</i> de forças normais	50
4.1.8	Limitações técnicas	51
4.2	Segunda sessão de testes	52
4.2.1	Testes na geometria inferior de nylon	53
4.2.2	Testes na geometria inferior de acetal	55
4.2.2.1	<i>Steps</i> de força com o acetal	56
4.2.3	Testes na geometria inferior de resina	56
4.2.3.1	Curva de <i>Stribeck</i> com a resina	57
4.2.4	Testes por fluido	57
4.3	Análise das imagens dos materiais nos microscópios	62
4.3.1	Microscópio óptico	62
4.3.2	MEV	64
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	67
	Referências bibliográficas	69

Lista de figuras

Figura 2.1	Curva clássica de <i>Stribeck</i>	14
Figura 2.2	Tipos de lubrificação	14
Figura 2.3	Diferenças entre a reologia e a tribologia	16
Figura 3.1	Reômetro rotacional <i>Discovery Hybrid Rotational 3</i>	22
Figura 3.2	Esboço do funcionamento do reômetro	22
Figura 3.3	Tribômetro convencional	23
Figura 3.4	Interface do software TRIOS	24
Figura 3.5	Imagem do microscópio óptico	25
Figura 3.6	Lavadora ultrassônica compacta	25
Figura 3.7	Demonstração da esfoliação do grafeno	26
Figura 3.8	Microscópio eletrônico de varredura	27
Figura 3.9	Visualização da tecnologia do <i>Peltier</i>	28
Figura 3.10	Configuração da geometria superior	29
Figura 3.11	Visão superior da geometria superior	29
Figura 3.12	Geometrias inferiores utilizadas	30
Figura 3.13	Formato de inserção de amostra	34
Figura 3.14	Limpeza externa da mostra	35
Figura 3.15	Esquema de visualização da tribo-reometria	36
Figura 3.16	<i>Steps</i> de forças normais	39
Figura 4.1	Curva de <i>Stribeck</i> de 3N com a representação dos regimes de lubrificação	41
Figura 4.2	Curva de <i>Stribeck</i> de 1N decrescente e crescente	42
Figura 4.3	Curva de <i>Stribeck</i> de 1N decrescente	43
Figura 4.4	Curva de <i>Stribeck</i> de 5N decrescente	44
Figura 4.5	Curva de <i>Stribeck</i> de 7N decrescente	45
Figura 4.6	Curva de <i>Stribeck</i> de 10N e reutilização de amostras	46
Figura 4.7	Curva de <i>Stribeck</i> de 12N crescente e decrescente	47
Figura 4.8	Curva de <i>Stribeck</i> 15N crescente e decrescente	48
Figura 4.9	Curva de <i>Stribeck</i> de 18N crescente e decrescente	49
Figura 4.10	Curva de <i>Stribeck</i> comparativas entre as diferentes forças normais	50
Figura 4.11	<i>Steps</i> de forças normais com velocidades altas	51
Figura 4.12	Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes amostras em nylon	53
Figura 4.13	<i>Steps</i> de força normal em 30 rad/s entre diferentes amostras em nylon	54
Figura 4.14	Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes amostras em nylon	55
Figura 4.15	<i>Steps</i> de força normal em 30 rad/s entre diferentes amostras em nylon	56
Figura 4.16	Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes amostras na resina	57

Figura 4.17 Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX pura	58
Figura 4.18 Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adiçao de GO	59
Figura 4.19 Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adiçao de NaCl e GO	60
Figura 4.20 Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adiçao de NaCl	61
Figura 4.21 Curva de <i>Stribeck</i> 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com todos os fluidos	62
Figura 4.22 Imagem do disco de alum3nio desgastado ap3s testes	63
Figura 4.23 Micrografias de alta resoluçao de dispers3es de goma xantana em diferentes ambientes: (a, d, g) dispersao de GX pura; (b, e, h) dispersao de GX em soluçao salina de 20% wt de NaCl; (c, f, i) dispersao de GX com 2 mg/mL de GO em soluçao de 20% wt de NaCl. As imagens foram coletadas em tr3s escalas: 200 μm (a-c), 20 μm (d-f) e 10 μm (g-i).	64
Figura 4.24 Micrografias de alta resoluçao de dispers3es de goma xantana para: (j, k) dispersao XG com 2 mg/mL de GO. As imagens foram coletadas em duas escalas: 200 μm e 10 μm .	65

Lista de tabelas

Tabela 3.1 Tabela de materiais utilizados no preparo dos fluidos de teste 32

1

Introdução

A tribologia é a ciência que estuda os fenômenos da interação de superfícies em movimento relativo, desempenhando um papel essencial na garantia de eficiência e sustentabilidade em sistemas mecânicos de diversos setores industriais. Desde sua conceituação formal, o estudo detalhado da disciplina tem evoluído significativamente, impulsionando avanços tecnológicos que oferecem maior controle e otimização dos mecanismos tribológicos.

Estima-se que aproximadamente 2% do PIB mundial ⁽¹⁾ poderia ser recuperado com a implementação de soluções tribológicas mais avançadas. Essa ciência tem um impacto direto na redução do consumo de energia e dos custos operacionais, contribuindo para o aumento da durabilidade de equipamentos, a melhoria da eficiência em processos industriais e a mitigação de impactos ambientais, tornando-se um pilar crucial para a inovação sustentável.

No contexto da indústria do petróleo, a demanda por um avanço tecnológico em tribologia se sobressai devido à natureza severa das condições operacionais, como altas pressões, temperaturas extremas e ambientes corrosivos. Esses fatores contribuem para o desgaste acelerado de equipamentos e elevados custos de manutenção e operação. Consequentemente, são necessárias soluções avançadas na mitigação da dissipação de energia, visando elevar a confiabilidade e a eficiência de sistemas mecânicos. Entre as opções tecnológicas mais promissoras, destaca-se a lubrificação com fluidos lubrificantes não-newtonianos, devido à sua capacidade de adaptação a diferentes condições operacionais.

Neste estudo, foi empregada a tribo-reometria, uma abordagem prática que integra a interdisciplinaridade entre tribologia e reologia. Essa técnica permite um mapeamento abrangente de parâmetros dissipativos, oferecendo maior diversidade na análise das interações tribológicas e reológicas. A combinação dessas disciplinas amplia a compreensão dos fenômenos envolvidos, proporcionando uma visão mais detalhada e aplicável às condições experimentais.

A tribo-reometria é um campo extremamente inexplorado. Mesmo que os testes sejam simples, a complexidade e a sensibilidade em relação a múltiplas variáveis fazem com que a discussão e análise dos resultados práticos sejam um desafio.

1.1

Objetivos

O trabalho teve um objetivo de:

1. Apresentar os conceitos fundamentais de fluidos não newtonianos e da teoria da lubrificação, estabelecendo uma base teórica sólida para o estudo.
2. Demonstrar a multidisciplinaridade entre Reologia e Tribologia
3. Demonstrar os avanços e aplicações da tribo-reometria em diversas indústrias
4. Contribuir para a pesquisa científica por meio do desenvolvimento de uma metodologia inédita para testes de caracterização de fluidos.
5. Coletar um extenso conjunto de dados experimentais, visando criar uma base de referência útil para tribologistas e outros pesquisadores da área.
6. Apresentar dados conclusivos em relação à características de lubrificação para diferentes compósitos em fluidos de perfuração.

2

Revisão teórica

2.1

Tribologia

A tribologia abrange o estudo de quatro diferentes tópicos: adesão, desgaste, atrito e lubrificação. A disciplina se concentra na análise da dissipação de energia que ocorre quando há interação entre duas superfícies em movimento relativo. O âmbito da tribologia une diversos domínios fundamentais da engenharia, incluindo mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, lubrificação química, ciência dos materiais e transferência de calor.

A adesão refere-se à tendência de partículas ou superfícies diferentes se unirem, fenômeno abrangente em vários processos biológicos, físicos e também de grande relevância na tribologia. É muito utilizado o estudo de adesão celular em hidratação de plantas, e também para a formação e reparação de tecidos celulares. Já na tribologia, ela desempenha um papel importante no atrito e no desgaste, afetando diretamente o desempenho mecânico de sistemas em contato. Quando duas superfícies se aderem fortemente, é necessária mais energia para separá-las ou mantê-las em movimento relativo, elevando o atrito. Além disso, essa interação adesiva, incluindo um entrelaçamento mecânico, pode facilitar a transferência de material de uma superfície para outra ou promover a remoção de fragmentos, contribuindo para o desgaste. Em suma, a intensidade da adesão afeta tanto o atrito quanto o desgaste, impactando diretamente o desempenho mecânico e a vida útil de sistemas que dependem de contato deslizante ou rolante.⁽²⁾

O desgaste mecânico ocorre quando duas superfícies sólidas entram em contato e se movem uma em relação à outra. Com o tempo, esse atrito faz com que elas percam parte do material, alterando sua forma, a rugosidade e até mesmo as propriedades do que compõe cada superfície. Esse processo resulta em menor eficiência mecânica, aumento de ruído e vibração. O surgimento de novas irregularidades e arestas aumenta a área de contato, o que influencia no aumento do atrito. Consequentemente, há o crescimento de falhas precoces e maiores custos de manutenção, sendo um fator chave na determinação da vida útil de peças e máquinas.⁽³⁾

O atrito é definido por ser a oposição do movimento ou restrição de um movimento relativo. A medição do atrito na tribologia é o ponto central do estudo,

pois é a partir do atrito que se quantiza a energia dissipativa em um sistema, permitindo avaliar como as forças de contato convertem energia mecânica em calor ou deformação, influenciando diretamente o desempenho e a vida útil de componentes. O atrito é condicionado a diversos fatores, como rugosidade superficial, temperatura, dureza dos materiais, interações eletrostáticas e químicas, além da presença de lubrificantes.

Como visto previamente, o desgaste e a adesão influenciam diretamente no atrito. E, como forma de mitigar tais fenômenos, há o emprego da lubrificação. Esta consiste na introdução de uma substância, geralmente um fluido ou película sólida, entre superfícies em contato para reduzir o atrito e o desgaste. Esse processo diminui o atrito ao impedir o contato direto entre os materiais, ao mesmo tempo em que dispersa calor e remove impurezas.

O objetivo do trabalho é aprofundar a compreensão sobre a teoria da lubrificação, abordando, em detalhes, seus diferentes regimes e avaliando-os na sua aplicação prática. A base essencial da teoria da lubrificação é representada pela curva clássica de *Stribeck*, que explora o comportamento do coeficiente de atrito em relação a um número adimensional influenciado pelos seguintes fatores:

- Velocidade de deslizamento do lubrificante (ou velocidade de entrada de lubrificante)
- Força normal aplicada ao lubrificante
- Viscosidade do lubrificante

A adequação do número adimensional varia dependendo da metodologia associada para o tipo de estudo, podendo ser o número de *Gumbel* (para aplicações com movimentos rotacionais), número de *Hersey*, número de *Sommerfeld* (para aplicações em mancais). Diversos parâmetros dimensionais e adimensionais são citados na literatura.

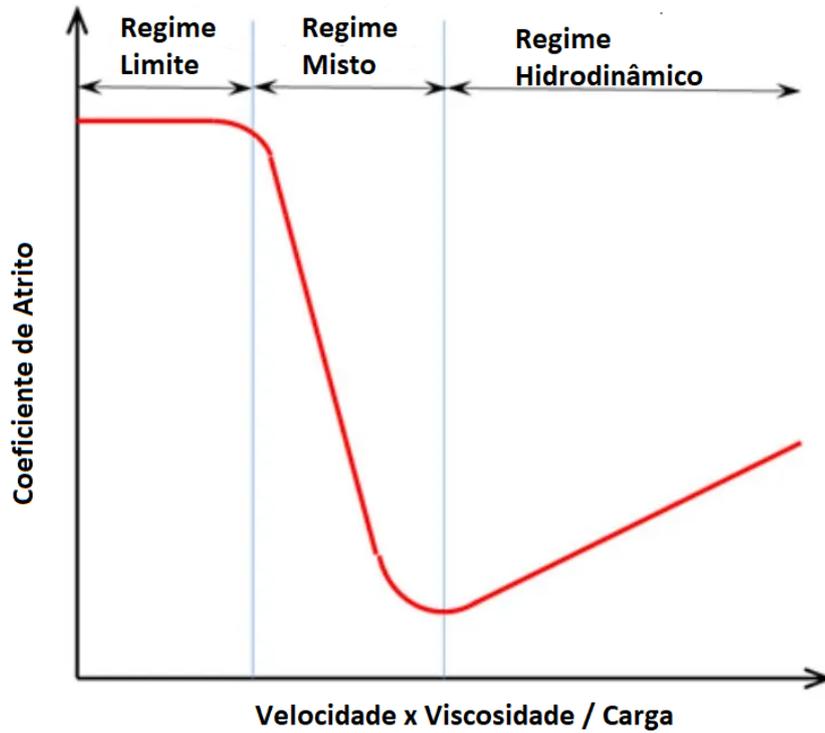


Figura 2.1: Curva clássica de *Stribeck*

A teoria da lubrificação aborda três tipos de estágios distintos: lubrificação limite, lubrificação mista e lubrificação hidrodinâmica. Estes são classificados de acordo com o grau de contato entre as asperezas das superfícies em atrito, definindo, assim, o regime de lubrificação predominante.

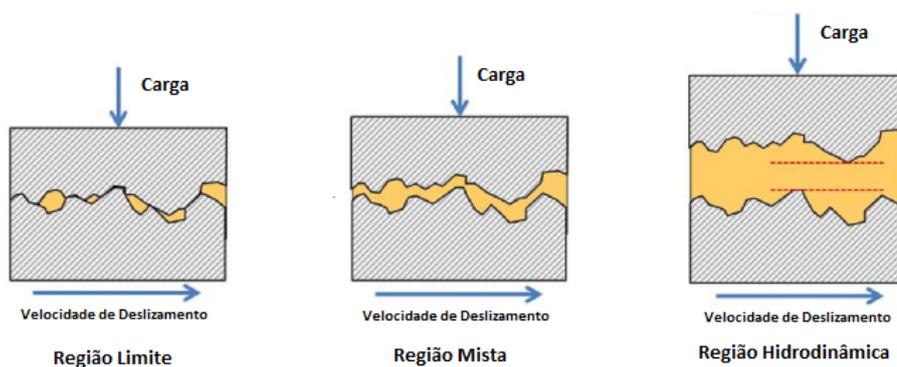


Figura 2.2: Tipos de lubrificação

A teoria clássica da lubrificação em movimentos rotacionais realiza a quantificação do número de *Gumbel*:

$$Gu = \frac{\eta \cdot v_s}{F_N} \quad (2-1)$$

Sendo:

- η a viscosidade do fluido
- F_N a força normal aplicada ao fluido
- v_s a velocidade de deslizamento na lubrificação do fluido

2.1.1

Região limite

Neste estágio, as asperezas das superfícies estão em contato direto, com pouca ou nenhuma separação proporcionada pelo lubrificante. Esse regime ocorre, geralmente, em condições de velocidade baixa ou carga alta, onde o filme lubrificante é extremamente fino ou inexistente.

O atrito e o desgaste são elevados, e a eficiência da lubrificação depende da composição química do lubrificante e de aditivos especializados. Nesse contexto, ocorre o que é denominado de atrito seco. A viscosidade do lubrificante tem influência mínima na cinemática do sistema.

O estudo desse tipo de lubrificação é notavelmente complexo, devido à necessidade de compreensão da natureza molecular das superfícies. O estudo da tribologia molecular entra em vigor nesse regime de lubrificação.

Na Região Limite, o comportamento do coeficiente de atrito é, aproximadamente, constante ao longo da variação do parâmetro de *Gumbel*.

2.1.2

Região mista

O regime de lubrificação mista é caracterizado como um estágio intermediário entre o regime hidrodinâmico e o regime limite. Nesse regime, ocorre uma combinação dos dois fenômenos. Parte da carga é suportada por um filme de lubrificação líquida, enquanto outra parte é sustentada pelo contato direto entre as superfícies sólidas. Essa coexistência torna a lubrificação mista um regime de entendimento fundamental, pois representa uma transição crítica no comportamento tribológico, onde tanto a viscosidade do lubrificante quanto as características das superfícies possuem relevância para o comportamento do atrito.⁽⁴⁾

2.1.3

Região hidrodinâmica

Nesse regime, as superfícies em contato são completamente separadas por um filme contínuo de lubrificante, eliminando qualquer interação direta entre as asperezas. O estágio ocorre em condições de alta velocidade ou carga reduzida, quando a espessura do filme é suficiente para suportar integralmente a carga aplicada. Nessa situação, o atrito é minimizado, enquanto o desgaste das superfícies torna-se, praticamente, inexistente. A força de oposição ao movimento é, majoritariamente, influenciada pela viscosidade do lubrificante ao invés do atrito entre as superfícies.

2.2

Fluidos não newtonianos e reologia

A influência da viscosidade citada no item anterior faz com que, seja tendência atual da tribologia, o aprofundamento da multidisciplinaridade com a reologia. A reologia aborda a ciência de fluidos de comportamento complexo, e uma das principais áreas de foco está correlacionada diretamente com o estudo da viscosidade, em fluidos não newtonianos.⁽⁵⁾ Esses fluidos são aqueles cuja viscosidade não é constante, mas varia em função da taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) aplicada, ilustrado na equação 2-2. Esse comportamento os diferencia dos fluidos newtonianos, nos quais a viscosidade permanece constante independentemente da taxa de cisalhamento.

$$\frac{d\eta}{d\dot{\gamma}} \neq 0 \quad (2-2)$$

Com isso, compreende-se que suas propriedades tenham aplicações diretas em diversas indústrias, com destaque para a indústria do petróleo, onde desempenham um papel crucial em operações como perfuração de rochas, transporte de cascalho e controle de pressão nos poços. A principal razão para estudar a reologia de fluidos de perfuração é garantir essas funcionalidades, mantendo padrões de viscosidades adequadas em diferentes taxas de cisalhamento associadas a essas operações. Por exemplo, durante a circulação no anular, o fluido enfrenta altas taxas de cisalhamento, tendo que possuir uma baixa viscosidade para uma menor restrição ao movimento relativo, enquanto em condições de repouso no poço, deve-se apresentar uma viscosidade elevada para suspender os cascalhos e evitar a sedimentação.⁽⁶⁾



Figura 2.3: Diferenças entre a reologia e a tribologia

A principal diferença entre tribologia e reologia reside na origem da dissipação energética em cada disciplina. Na reologia, a dissipação ocorre devido à viscosidade do fluido, ou seja, pelo atrito interno entre as moléculas do próprio fluido. Esse atrito molecular resiste ao movimento e causa a retenção de energia, sendo um fenômeno intrínseco ao material. Por outro lado, na tribologia, a dissipação energética é gerada pelo atrito superficial, que ocorre na interface entre duas superfícies em contato relativo. Esse atrito resulta de interações mecânicas e químicas entre as superfícies, influenciadas por fatores como rugosidade, lubrificação e carga aplicada, tornando-o um fenômeno de interface.

A figura 2.3 ilustra como a reologia se aproxima da tribologia à medida que a espessura da camada lubrificante entre as superfícies diminui. Esse comportamento reflete a transição de um regime predominantemente reológico, onde o fluido apresenta propriedades de volume e a dissipação viscosa domina a interação, para um regime tribológico, onde o atrito e o desgaste na interface das superfícies tornam-se mais relevantes.

2.3

Tribo-reometria

A tribo-reometria é a combinação das ciências de reologia e de tribologia. Refere-se à aplicação de técnicas reométricas para avaliar as propriedades em condições de contato e movimento relativo.

2.3.1

Parâmetros variados

2.3.1.1

Características mecânicas das superfícies de interface

Cada material apresenta uma rugosidade característica, a qual influencia diretamente a dinâmica entre duas superfícies em contato e seu regime de lubrificação.

2.3.1.2

Temperatura

Em regimes hidrodinâmicos, as forças viscosas tornam-se notáveis, tornando a variação de temperatura especialmente relevante nesse contexto. Estudos já demonstraram que, em testes tribológicos convencionais, o atrito e o desgaste aumentam significativamente com o incremento da temperatura.⁽⁷⁾

2.3.1.3

Força normal

O incremento da força normal entre as duas superfícies impacta diretamente no regime de lubrificação associado ao modelo tribológico, especialmente no regime hidrodinâmico, quando as forças viscosas do fluido lubrificante possuem influência significativa sobre o atrito.

2.3.1.4

Velocidade de deslizamento

A velocidade de deslizamento é uma variável fundamental na tribo-reometria, porque condiciona consideravelmente os regimes de lubrificação e o comportamento tribológico das superfícies em contato. À medida que a velocidade de deslizamento aumenta, a espessura do filme lubrificante tende a crescer, diminuindo o contato entre as asperezas, alterando o regime de lubrificação de limite para misto e, eventualmente, para hidrodinâmico.

2.3.2

Master curve

A curva de *Stribeck* é uma teoria ainda pouco explorada no contexto de fluidos não newtonianos. Na maioria das investigações tribológicas, a parcela da viscosidade presente no número de *Gumbel* é frequentemente tratada como constante, baseando-se na hipótese de que o fluido de trabalho possui comportamento newtoniano. No entanto, essa simplificação pode limitar a precisão dos resultados quando aplicada a fluidos com situações complexas.

Inferese-se que, para uma validação mais robusta da teoria da curva de *Stribeck* em fluidos não newtonianos, é fundamental abandonar essa hipótese e realizar uma calibração detalhada de uma *flow curve* reológica, tentando-se adaptar às condições de tribologia.⁽⁸⁾

A equação de *Gumbel* adaptada a fluidos não newtonianos, portanto, seria:

$$Gu = \frac{\eta(\dot{\gamma}(v_s)) \cdot v_s}{F_N} \quad (2-3)$$

2.4

Aplicações

As aplicações da tribologia e tribo-reometria abrangem uma ampla gama de disciplinas e setores industriais. Entre elas, há aplicações clássicas da tribologia:

- Indústria automotiva: formulação de lubrificantes para o aprimoramento no desempenho de motores, sistemas de transmissão e frenagem.

- Indústria siderúrgica: otimização de sistemas de lubrificação em rolos durante a laminação.
- Máquinas no geral: sustentação em rolamentos de mancais e preservação da vida útil de ativos com a mitigação do desgaste de peças

Da mesma forma, também há vertentes de estudo como a *soft tribology* englobando diversas outras indústrias. Na indústria de alimentos, por exemplo, o estudo é abordado para compreender como propriedades de atrito e viscosidade permitem avaliar a cremosidade, suavidade e adesividade dos alimentos, a partir de testes com diferentes concentrações de óleos, proteínas, emulsões ou outros ingredientes. Na indústria de cosméticos, é possível realizar um mapeamento sensorial detalhado por meio de testes tribo-reométricos, simulando a aplicação de produtos em diferentes condições. Esses testes permitem avaliar propriedades como suavidade, espalhabilidade, aderência e sensação residual dos cosméticos, correlacionando essas características com a percepção sensorial do consumidor. Há, também, a aplicação do estudo da *soft tribology* em diversas outras indústrias como a biomédica e a de polímeros.

2.4.1

Aplicação da reologia e tribologia com fluidos de perfuração

Na indústria do petróleo, a tribo-reometria tem como função a otimização de propriedades de fluidos de perfuração, não só garantindo as suas características reológicas que, como citadas anteriormente, são essenciais para as condições de operação na perfuração de poços, mas também para garantir o desempenho tribológico, diminuindo o atrito entre as superfícies, resultando em uma maior eficiência, segurança e viabilidade ecológica na operação, a partir de uma formulação adequada.

Um dos fatores que impulsionam o avanço nos fluidos de perfuração para poços de petróleo é a necessidade de tornar o processo mais eficiente. Aumentar a taxa de penetração não apenas encurta o tempo total de perfuração, mas também melhora a rentabilidade, pois reduz gastos relacionados a interrupções e manutenção frequente. Nesse cenário, a tribologia exerce um papel essencial para desenvolver formulações que diminuam o atrito entre a broca e a rocha, tornando o corte mais efetivo e exigindo menos esforço mecânico.

Paralelamente, cresce a preocupação com sustentabilidade e impacto ambiental, o que incentiva o uso de fluidos à base de água no lugar dos tradicionais fluidos oleosos. Embora ainda não atinjam o mesmo desempenho em condições extremas de temperatura e pressão, esses fluidos aquosos causam menos danos ambientais, algo cada vez mais valorizado pelas empresas e pela legislação. O grande desafio é aprimorar as propriedades reológicas e tribológicas desses fluidos para equipará-los aos convencionais, sem sacrificar a eficiência na perfuração.

Outro ponto importante é que, ao melhorar os aspectos tribológicos, é possível prolongar a vida útil dos equipamentos. Menos torque, menor desgaste da broca e menor atrito na coluna de perfuração ajudam a evitar falhas e paradas inesperadas, garantindo a integridade do processo. Controlar esses fatores também contribui para manter a estabilidade do poço e minimizar problemas como o *stuck pipe*⁽⁹⁾, otimizando custos e elevando a segurança de operação.

Uma das estratégias para aprimorar o desempenho de fluidos à base de água envolve a adição de nanopartículas.⁽¹⁰⁾ Exemplos como óxido de grafeno, dissulfeto de molibdênio ou nanotubos de carbono podem criar filmes lubrificantes em escala molecular, melhorando a fluidez e reduzindo o atrito em cenários críticos de pressão e temperatura. Por exemplo, a adição de óxido de grafeno atua em redes de estrutura bidimensional compostas por nanofolhas dispostas em uma rede hexagonal e, conseqüentemente, obtém-se uma maior uniformidade celular, diminuindo o atrito de modo geral. Essa abordagem une a diminuição do impacto ambiental ao desempenho semelhante ao dos fluidos à base de óleo, abrindo caminho para perfurações de poços de petróleo cada vez mais seguras, econômicas e sustentáveis.

3

Materiais e Método Experimental

Este capítulo descreve os materiais usados e os procedimentos adotados para os experimentos sobre curvas de *Stribeck* com fluidos não newtonianos. A pesquisa focou na análise do comportamento tribológico de soluções de goma xantana sob diferentes condições de deslizamento e carga, usando equipamentos específicos para medir atrito e força normal. Os métodos incluem a preparação cuidadosa dos fluidos, a introdução e configuração precisa dos instrumentos experimentais e a análise detalhada da dinâmica experimental.

3.1

Instrumentos utilizados

O estudo é conduzido utilizando um reômetro rotacional, instrumento cujas principais funções se descrevem em caracterizar fluidos por meio de testes reológicos em fluidos. O teste de tribo-reometria é uma extensão na aplicação do reômetro. Normalmente, o teste ocorre por meio do controle do torque para a análise de diversos parâmetros, como a viscosidade em função da deformação, variáveis de caracterização elástica, viscosa, tixotrópica, entre outros parâmetros reológicos. A aplicação de uma força normal e, conseqüentemente, a diminuição da camada de fluido entre as superfícies, pode fazer um experimento transitar do campo da reologia para o domínio da tribologia.

3.1.1

Reômetro rotacional híbrido

O *Discovery Hybrid Rheometer 3* (DHR-3), fabricado pela TA Instruments, é uma ferramenta de alta precisão projetada para medir as propriedades reológicas de materiais sob diferentes condições de deformação e cisalhamento. Seu motor de orientação rotativa, controlado digitalmente, permite a aplicação de torques estáveis e precisos, fundamentais para estudos detalhados de materiais. A tecnologia de rolamento magnético reduz o atrito interno, aumentando a sensibilidade para medições de baixo torque, o que é crucial para materiais com propriedades viscoelásticas sutis.

Além disso, o DHR-3 está equipado com um transdutor de força de reequilíbrio, que realiza medições exatas da força normal F_N aplicada durante os testes. Este



Figura 3.1: Reômetro rotacional *Discovery Hybrid Rotational 3*

recurso é especialmente útil para avaliar o comportamento tribológico e as interações estruturais de materiais complexos. O encoder óptico de alta resolução garante precisão no deslocamento angular, enquanto o sensor *True Position Sensor* (TPS) compensa variações térmicas em tempo real⁽¹¹⁾, assegurando resultados confiáveis mesmo em condições de temperatura variada.

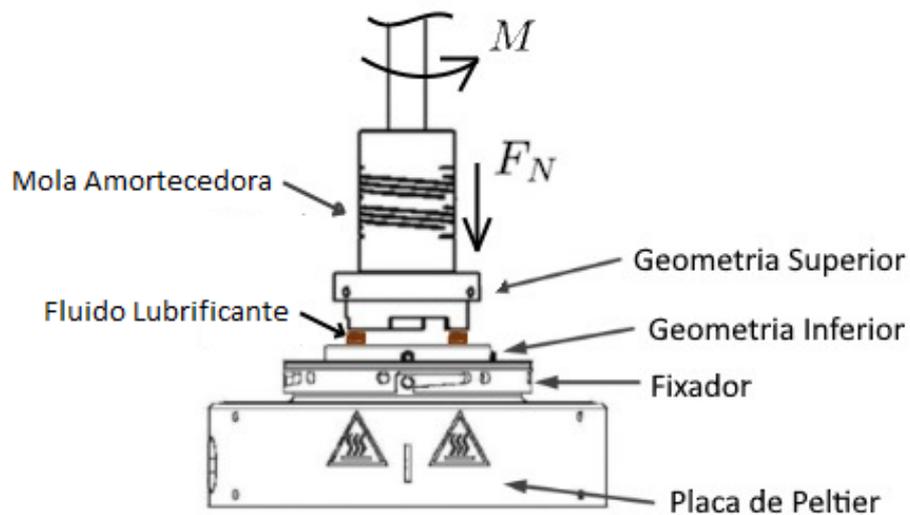


Figura 3.2: Esboço do funcionamento do reômetro

Os tribologistas, de modo geral, utilizam o tribômetro convencional projetado especificamente para medir propriedades tribológicas, como coeficiente de atrito,

desgaste e lubrificação entre superfícies em contato, é ilustrado pela figura 3.3. Apesar de ser altamente especializado, sua análise é limitada às características tribológicas. Além disso, esse equipamento geralmente oferece menor controle sobre as condições de teste, como variações térmicas ou velocidades de deslizamento em intervalos extremamente baixos, o que pode limitar sua aplicabilidade em estudos mais detalhados.

A versatilidade do DHR-3 é um dos seus maiores diferenciais, possibilitada pelo sistema *Smart Swap*^{TM(11)}, que permite a rápida troca de acessórios e geometrias para diferentes tipos de ensaios. Ele também é compatível com sistemas avançados de controle de temperatura, como placas Peltier e câmaras ambientais, que ampliam a gama de aplicações e garantem a análise reológica em temperaturas controladas. Essas características fazem do DHR-3 uma ferramenta essencial e eclética para pesquisa e desenvolvimento em diversas áreas industriais e acadêmicas.

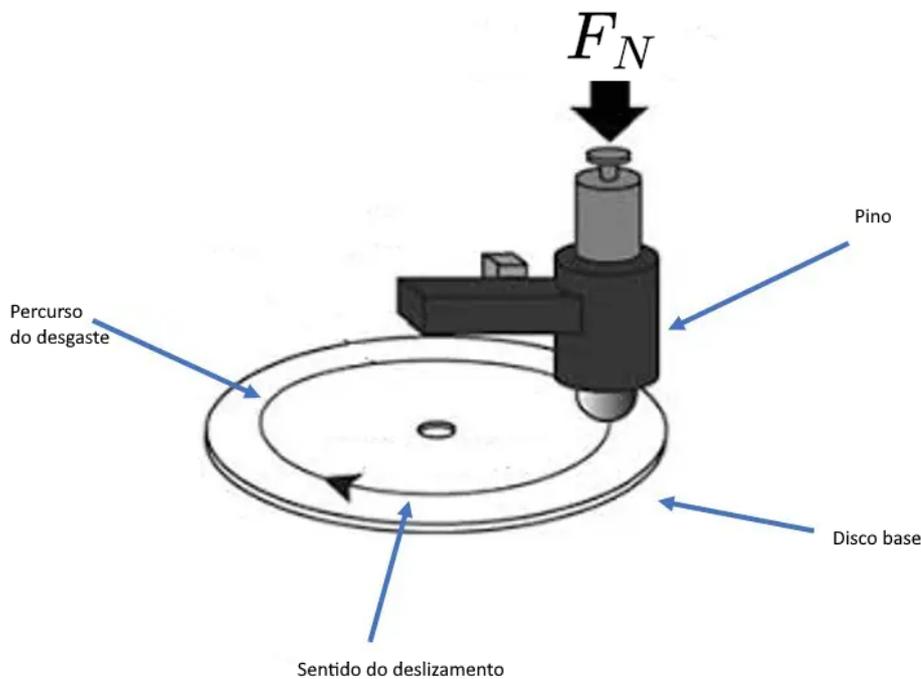


Figura 3.3: Tribômetro convencional

O software de operação do DHR-3, TRIOS, foi desenvolvido para a operação e análise de reômetros híbridos, incluindo o modelo DHR-3. Trata-se de um software cuja interface foi projetada para ser intuitiva, permitindo configurar e controlar os experimentos com o nível adequado de precisão—com controle de parâmetros como torque, taxa de cisalhamento, temperatura e força normal. Além disso, o TRIOS suporta a coleta e análise de dados em tempo real, oferecendo a capacidade de criar gráficos, tabelas e relatórios de forma flexível, facilitando a interpretação dos resultados de maneira prática e conveniente. O software também inclui fer-

ramentas avançadas de cálculo reológico, como a modelagem de comportamento viscoelástico, *curve fitting* (ajuste de curvas) e a criação de gráficos de propriedades tribológicas, como as conhecidas curvas de *Stribeck*.

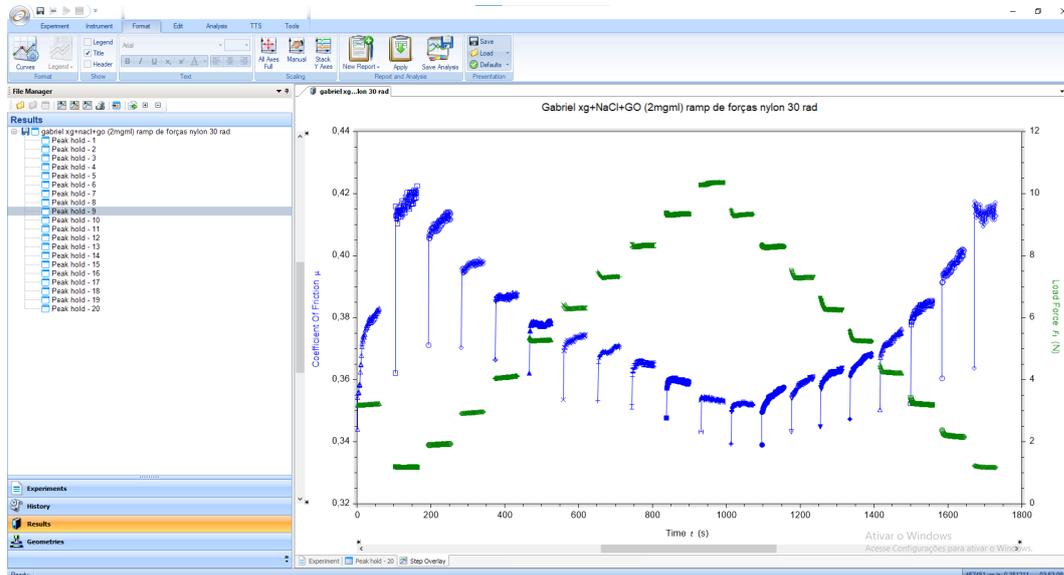


Figura 3.4: Interface do software TRIOS

3.1.2

Microscópio óptico

O microscópio óptico, Nikon Eclipse LV100N POL, foi utilizado para observar os desgastes nas superfícies das geometrias inferiores após os testes de triboimetria. A observação das áreas de contato permitiu identificar, qualitativamente, padrões de desgaste, como sulcos e arranhões. A simplicidade e a eficiência do microscópio óptico foram fundamentais para documentar as alterações superficiais em diferentes escalas.



Figura 3.5: Imagem do microscópio óptico

3.1.3

Lavadora ultrassônica compacta

A Lavadora ultrassônica compacta é necessária no processo de esfoliação do Óxido de Grafeno.



Figura 3.6: Lavadora ultrassônica compacta

O processo de esfoliação, na cuba de lavagem ultrassônica, é utilizado separando suas camadas individuais a partir de materiais gráfiticos ou de óxido de grafite. Durante esse processo, visto na figura 3.7, uma solução contendo óxido de grafite é submetida à ação de ondas ultrassônicas geradas pela cuba. Essas ondas criam ciclos de compressão e rarefação no líquido, provocando um fenômeno chamado cavitação⁽¹²⁾, onde microbolhas se formam, crescem e implodem de maneira rápida e localizada.

A implosão dessas bolhas gera intensas forças mecânicas, como cisalhamento e pressão, que atuam nas camadas do óxido de grafite. Essas forças são suficientemente fortes para romper as interações entre as camadas, resultando em sua separação e na formação de folhas finas de óxido de grafeno.

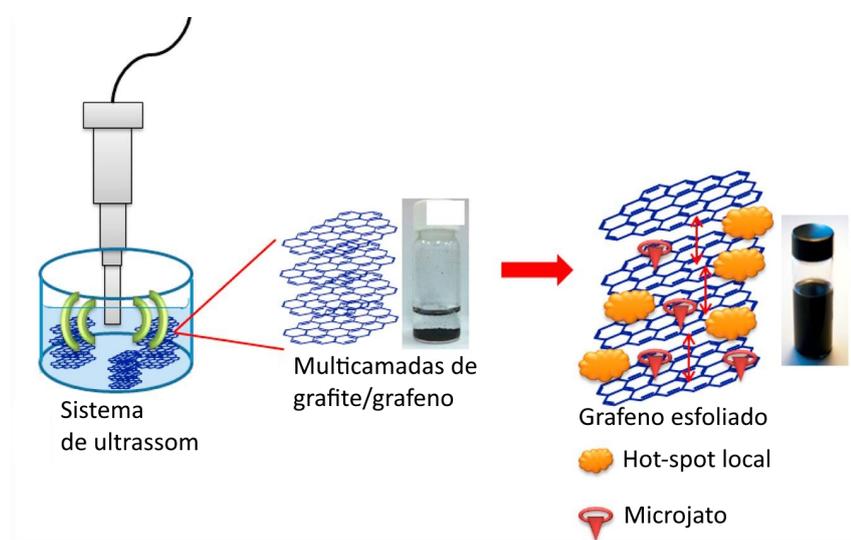


Figura 3.7: Demonstração da esfoliação do grafeno

3.1.4 Microscópio eletrônico de varredura

O microscópio eletrônico de varredura (MEV), exibido na figura 3.8, é uma ferramenta amplamente utilizada para caracterizar superfícies em nível microscópico com alta resolução. Diferentemente dos microscópios ópticos, o MEV utiliza um feixe de elétrons ao invés de luz para varrer a superfície da amostra. Há a interação dos átomos do material com este feixe de elétrons, gerando sinais que são capturados e processados para formar imagens detalhadas da topografia, morfologia e composição da superfície.⁽¹³⁾ O equipamento foi utilizado para investigar os padrões microestruturais dos fluidos de trabalho, com foco especial nas alterações microestruturais geradas pelas concentrações de GO e sal, revelando aspectos como o tamanho, a espessura das folhas e a uniformidade na dispersão do material.

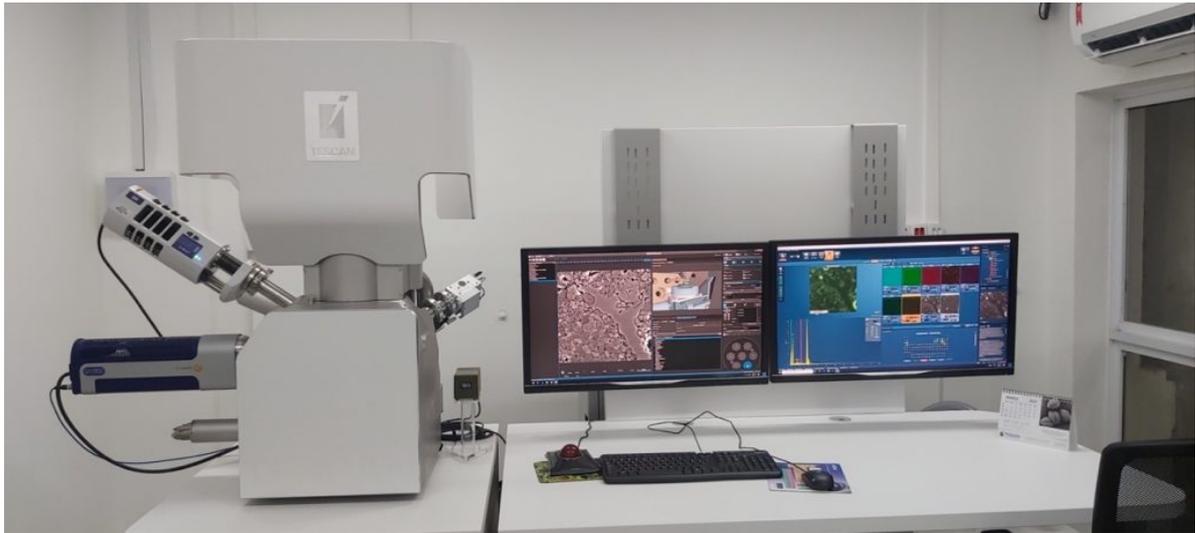


Figura 3.8: Microscópio eletrônico de varredura

3.1.5

Placa de *Peltier*

A placa *Peltier* desempenha duas funções principais no reômetro. A primeira é atuar como base para a geometria inferior, proporcionando suporte estável para a amostra durante os testes. A segunda, e mais crucial, é controlar a temperatura da amostra com alta precisão e estabilidade. Por meio de efeito termelétrico, associado a um sistema de banho térmico, a placa *Peltier* permite o aquecimento ou resfriamento das amostras, ajustando a temperatura conforme as condições experimentais necessárias.

A visualização de um sistema de *Peltier* pode ser vista na figura 3.9.

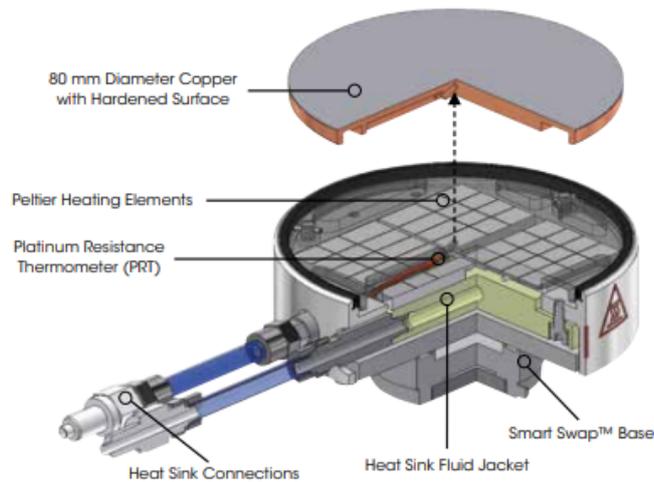


Figura 3.9: Visualização da tecnologia do *Peltier*

3.1.6 Geometria superior

A geometria superior é conectada a uma haste, que, por sua vez, está acoplada ao rotor do reômetro, permitindo a aplicação precisa do movimento necessário para os testes. Um sistema de mola é integrado à configuração, atuando como amortecedor para reduzir vibrações e instabilidades que possam ocorrer durante o experimento.

A configuração da geometria superior consiste em um formato anular, podendo ser montada por duas orientações:

- *Full-ring*
- *Half-ring*

É possível visualizar a mesma peça apresentando duas faces *full-ring* e *half-ring* na figura 3.10.



Figura 3.10: Configuração da geometria superior

As propriedades R_{ext} (raio externo) e R_{int} (raio interno) sendo representadas na figura 3.11

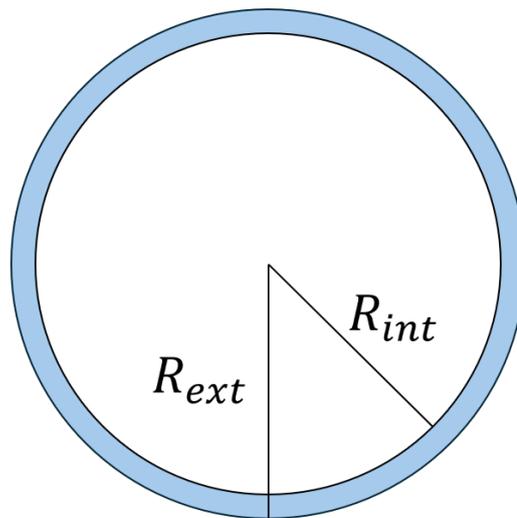


Figura 3.11: Visão superior da geometria superior

Dados métricos referentes aos raios são apresentados abaixo:

- $R_{ext} = 16,0\text{mm}$
- $R_{int} = 14,5\text{mm}$

No sistema *half-ring*, a superfície de contato é reduzida pela metade, em comparação ao *full-ring*, sendo composta por três segmentos de superfície distribuídos de forma uniforme, com separação angular de 120° entre eles. A literatura indica

que a geometria *half-ring* proporciona condições mais favoráveis de lubrificação durante os testes.⁽¹⁴⁾ No entanto, como será discutido posteriormente, essa configuração apresentou limitações técnicas que comprometeram a análise dos resultados. Por outro lado, a geometria *full-ring* forneceu dados consolidados e confiáveis ao longo dos experimentos.

3.1.7

Geometria Inferior

A geometria inferior consiste em um disco liso, disponível em diferentes opções de material, onde a amostra é inserida para os testes. Por design, o material da geometria inferior é propositalmente menos duro que o da geometria superior, que é fabricada em aço inoxidável. Essa diferença de dureza é intencional e visa otimizar as condições de contato e evitar o desgaste da geometria superior, que dispõe de uma estrutura mais sofisticada.

3.2

Materiais utilizados para a geometria inferior

A seleção do material da geometria inferior influencia diretamente as condições de contato. Essa escolha permite ajustar os testes a diferentes arranjos experimentais e explorar uma ampla variabilidade nos resultados. Para esse propósito, foram utilizados materiais com distintas durezas e propriedades lubrificantes, possibilitando uma análise aprofundada de diferentes sistemas, viabilizando obter uma melhor associação com diferentes aplicações práticas.

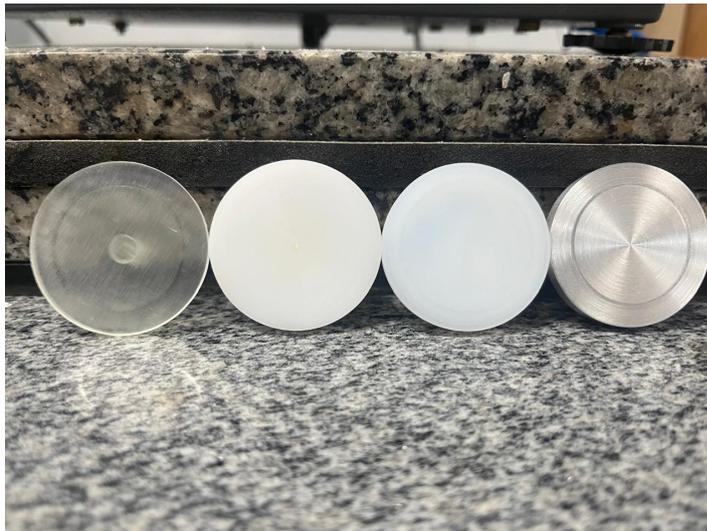


Figura 3.12: Geometrias inferiores utilizadas

3.2.1

Alumínio anodizado e alumínio aeronáutico

Dois tipos de alumínio foram operados como geometrias inferiores nos testes. Inicialmente, foi utilizado o alumínio anodizado (fornecido pela *TA Instruments* em ampla quantidade), que apresentou extremo desgaste durante os ensaios, inviabilizando conclusões confiáveis. Como alternativa, foi realizada a usinagem de outro tipo de alumínio, o alumínio aeronáutico (disco à direita na figura 3.12), na tentativa de viabilizar o experimento. Contudo, os estudos com esse material também não obtiveram sucesso, em virtude de sua baixa dureza, o que comprometeu os resultados dos testes.

3.2.2

Resina

Como alternativa ao alumínio, foi utilizado um disco de resina *Resin Clear V4* fabricada por impressão 3D. Em razão da sua alta disponibilidade, tornou-se viável para a realização da primeira etapa dos testes, sendo a opção mais acessível. No entanto, sua baixa uniformidade planar apresentou uma limitação significativa, especialmente para situações que exigiam superfícies extremamente regulares e consistentes.

3.2.3

Acetal

O acetal, representado pelo segundo disco à esquerda na figura 3.12, foi amplamente empregado como material para a geometria inferior. O polímero possui propriedades de autolubrificação, com baixa fricção intrínseca e alta resistência ao desgaste.⁽¹⁵⁾

3.2.4

Nylon

Outro material com alta resistência ao desgaste, o Nylon, terceiro disco à esquerda na figura 3.12, serviu para complementar as análises e ampliar o escopo da investigação tribo-reométrica.

3.3

Fluidos utilizados

1. Solução de goma xantana com base em água
2. Solução de goma xantana com base em água e adição de NaCl

3. Solução de goma xantana com base em água e adição de Óxido de Grafeno (GO).
4. Solução de goma xantana com base em água e adição de NaCl e Óxido de Grafeno (GO).

Para garantir a reprodutibilidade e a confiabilidade dos experimentos, o preparo adequado dos fluidos utilizados foi realizado seguindo procedimentos padronizados. Essa etapa é essencial para assegurar a uniformidade das amostras e minimizar a influência de variáveis externas, como heterogeneidade ou contaminantes, que poderiam impactar nos resultados reológicos e tribológicos. Os bactericidas benzoato de sódio e sorbato de potássio foram utilizados para a manutenção da estabilidade das propriedades da goma xantana durante seu uso e armazenamento.

Materiais	Abreviação	Valor em 100ml de solução
Goma Xantana	<i>GX</i>	0,86g
Água Destilada	<i>H₂O</i>	98,14ml
Sorbato de Potássio	<i>C₆H₇KO₂</i>	500mg
Benzoato de Sódio	<i>C₇H₅NaO₂</i>	500mg
Óxido de Grafeno	<i>GO</i>	200mg
Cloreto de Sódio	<i>NaCl</i>	20% <i>m_{soluo}</i>

Tabela 3.1: Tabela de materiais utilizados no preparo dos fluidos de teste

A seguir, são detalhados os processos empregados na preparação das amostras utilizadas nos testes.

1. Adição da água destilada em um *becker*.
2. Pesagem de todos os componentes em uma balança analítica de elevada precisão. Quantidades são descritas na tabela 3.1.
3. Adição do Óxido de Grafeno à solução em um recipiente fechado.
4. Caso a amostra contenha o Óxido de Grafeno, realização da lavagem ultrassônica da solução na Cuba Ultrassônica por 2 horas, com homogeneização mecânica a cada 30 minutos.
5. Incorporação da goma xantana à solução em um béquer, utilizando um misturador de fluidos a 300 rpm por 15 minutos.
6. Mistura dos bactericidas a 300 rpm, com duração de 15 minutos para fluidos contendo cloreto de sódio. Na ausência do sal, o tempo estende-se para 1 hora, finalizando o processo de mistura.

7. Quando há sal na composição, o material restante é inserido e a mistura prolonga-se por 45 minutos, completando 1 hora e 15 minutos no total (tempo equivalente de mistura para todos os fluidos).
8. Repouso de 24 horas da amostra.
9. Realocação das amostras em tubos de ensaio para o procedimento de centrifugação.
 - a) Aceleração por 5 minutos
 - b) Rotação constante à 1500rpm por 15 minutos
 - c) Frenagem por 5 minutos

3.4

Metodologia

A metodologia de tribo-reometria, adotada neste trabalho, foi desenvolvida para avaliar as propriedades tribológicas de fluidos sob condições controladas de deslizamento e carga. Por se tratar de um experimento altamente recente na pesquisa, a ausência de uma padronização consolidada exigiu que o desenvolvimento da metodologia fosse realizado de forma empírica, ajustando-se às variáveis e aos procedimentos ao longo do estudo. Embora exista um procedimento básico para tribo-reometria descrito pelo fabricante⁽¹⁶⁾, ele se mostra um tanto vago ao considerar a sensibilidade dos resultados frente a diferentes variáveis. Assim, foi necessário adaptar as condições experimentais e refinar os parâmetros de forma iterativa para garantir a confiabilidade e a representatividade dos dados obtidos. A seguir, são apresentados os detalhes da configuração experimental e das etapas seguidas no desenvolvimento e execução dos testes.

3.4.1

Rotina de calibração diária

O primeiro passo, antes do preparo de testes, é a calibração do DHR-3 e do equipamento com a geometria devidamente acoplada. A rotina de calibração inicial do reômetro é composta por:

1. Calibração do torque do DHR-3 sem a parte superior da geometria
2. Calibração das forças inerciais com a geometria de tribo-reometria
3. Calibração do coeficiente de atrito no eixo do motor com a geometria
4. Mapeamento preciso de deslocamentos angulares com diferentes faixas de torque.

Logo após, é realizada a montagem completa da geometria para o prosseguimento dos experimentos (visto na figura 3.2).

3.4.2

A calibração do *gap*

Após a montagem da geometria completa de tribo-reometria, a primeira etapa dos testes é realizar a calibração vertical do equipamento.

O *zero gapping* é uma etapa crítica na tribo-reometria, pois garante a precisão no posicionamento entre as superfícies em contato, estabelecendo um ponto de referência inicial para os testes. Sem um *zero gapping* adequado, pequenas variações na distância inicial podem gerar discrepâncias significativas nos resultados do coeficiente de atrito e força normal, mesmo com valores na ordem de grandeza de $10\mu\text{m}$, comprometendo a confiabilidade dos dados.

3.4.3

Inserção da amostra

A inserção da amostra é realizada utilizando uma pipeta para aplicar 2,5 mL de fluido em cada ensaio, garantindo precisão e uniformidade no volume. A amostra é cuidadosamente depositada no formato anelar, como na figura correspondente ao design da geometria superior do reômetro.



Figura 3.13: Formato de inserção de amostra

3.4.4

Limpeza externa da amostra

A limpeza da amostra é uma etapa imprescindível para garantir a padronização dos dados obtidos nos testes.

O próximo passo nos testes é acionar o comando que ajusta o reômetro até que a compressão mínima seja detectada pelo sensor de força. Essa etapa força

o excesso de fluido a ser expelido para fora da região de contato, formando uma película externa à geometria anelar. Esse procedimento é essencial para preparar a amostra antes do início das medições, assegurando uma distribuição controlada do fluido.

Para garantir a consistência e a reprodutibilidade dos resultados, foram realizados diversos testes, visando identificar a melhor abordagem para padronizar o processo. A solução definida empiricamente incluiu a adoção de um gap mínimo de referência de $200\ \mu\text{m}$.

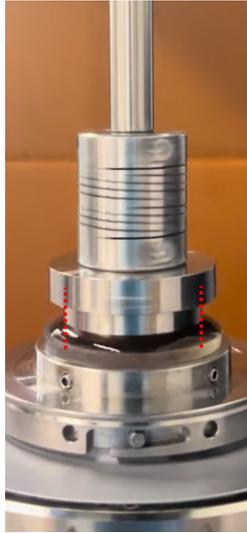


Figura 3.14: Limpeza externa da mostra

Em seguida, foi implementada a prática de limpeza externa da amostra, alinhada paralelamente à geometria anelar, ilustrada na figura 3.14. Essa estratégia, baseada na metodologia tradicional da reologia com geometrias opacas, como placas paralelas ou cones, tem como principal objetivo garantir que o fluido permaneça restrito à área funcional do anel, eliminando excessos externos. A execução dessa limpeza é fundamental para mitigar o torque residual causado por fluido excedente, evitando interferências nas medições e assegurando a confiabilidade e precisão dos resultados obtidos.

A próxima etapa consiste em introduzir a força normal associada ao teste, garantindo as condições de trabalho desejadas e prontificando a execução dos testes. O gap mínimo de $200\ \mu\text{m}$ foi definido de forma deliberada, pois, mesmo quando a força normal de trabalho é alcançada, ainda permanece a película externa ao anel, que não fica completamente alinhada.

Optou-se por essa configuração devido à perda excessiva de fluido durante a limpeza externa. Após a definição da força de trabalho (consideravelmente maior à equivalente a $200\ \mu\text{m}$), foi possível observar essa perda excessiva de fluido. Em experimentos preliminares, quando essa abordagem não foi utilizada, a redução

gradual do fluido de trabalho ao longo do tempo resultou em dados inconsistentes, forçando o sistema a entrar prematuramente na região de lubrificação limite. Essa condição comprometeu a representatividade e a uniformidade dos testes ao longo da varredura, afetando a confiabilidade dos resultados obtidos.

Ao término de cada teste, foi realizada a higienização completa de ambas as geometrias, seguida por uma secagem com ar comprimido. Esse procedimento assegura que as superfícies estejam completamente limpas e prontas para os testes subsequentes.

3.5

Dinâmica do experimento

A dinâmica do reômetro é baseada na interação de dois fluxos principais de potência que controlam os parâmetros experimentais: o torque aplicado pelo motor (M) e a força normal (F_N) gerada pelo atuador de pressão. Esses dois elementos trabalham em conjunto para replicar as condições de trabalho específicas necessárias para os testes. Visualização na figura 3.15:

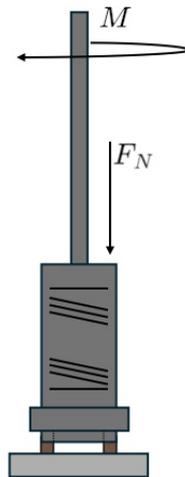


Figura 3.15: Esquema de visualização da tribo-reometria

As propriedades de interesse são o coeficiente de atrito (μ) e a velocidade de deslizamento (v_s). A curva experimental de *Stribeck* é construída analisando o comportamento do atrito em função exclusiva da velocidade. Logo, para facilitar a interpretação da curva, as outras variáveis presentes na formulação clássica de *Stribeck*, da teoria da lubrificação, são consideradas e trabalhadas como constantes. Essa abordagem permite focar em uma análise primária do efeito da velocidade sobre o atrito, facilitando a identificação dos regimes de lubrificação, fazendo uma varredura sob uma variável e proporcionando maior clareza na avaliação do desempenho do fluido em estudo.

Além disso, outras abordagens também são realizadas, variando a força normal em diferentes condições experimentais. Essa variação permite um mapeamento mais abrangente do comportamento do atrito, tanto em uma configuração específica, quanto em configurações alternativas. Ao explorar como o atrito responde a diferentes níveis de carga axial, é possível compreender melhor a transição entre os regimes de lubrificação e avaliar a influência da carga sobre o desempenho do fluido.

O coeficiente de atrito é definido como a razão entre forças de atrito e normais que atuam sob uma superfície. No entanto, para obter uma generalização mais representativa ao longo de um elemento não infinitesimal, essa definição é adaptada considerando a razão entre as pressões normais e de atrito. Esse enfoque permite uniformizar a análise ao longo de toda a geometria, levando em conta a distribuição das forças por unidade de área.

$$\mu = \frac{\overline{\sigma}_F}{\overline{\sigma}_N} \quad (3-1)$$

A pressão normal é definida pela força normal do reômetro atuando sobre a superfície inferior do anel, que está em contato com a geometria inferior.

$$\sigma_N = \frac{F_N}{\pi(R_{ext}^2 - R_{int}^2)\psi_s} \quad (3-2)$$

Sendo ψ_s , a razão entre a área de contato do anel com a geometria inferior sobre a área total de superfície do anel. Ou seja:

- Geometria superior *half-ring* $\rightarrow \psi_s=0,5$
- Geometria superior *full-ring* $\rightarrow \psi_s=1,0$

A força de atrito em função do torque M é descrita por:

$$F_F = \frac{R_{int} + R_{ext}}{(R_{ext}^2 + R_{int}^2)} M \quad (3-3)$$

Aplicando uma substituição algébrica, a tensão de atrito é:

$$\sigma_F = \frac{2M\bar{R}}{\pi(R_{ext}^4 - R_{int}^4)\psi_s} \quad (3-4)$$

Considerando \bar{R} o raio médio.

$$\bar{R} = \frac{R_{ext} + R_{int}}{2} \quad (3-5)$$

Para a definição da velocidade de deslizamento, adota-se a hipótese de que a espessura do anel é desprezível em comparação ao raio médio do anel. Isso permite considerar a superfície do anel como idealmente concentrada em um único raio médio, simplificando os cálculos relacionados à cinemática e às forças atuantes no sistema.

$$t = R_{ext} - R_{int} \ll \bar{R} \quad (3-6)$$

Portanto:

$$v_s \cong v_{s,ext} \cong v_{s,int} \cong \bar{R}\omega \quad (3-7)$$

Sendo ω , a velocidade angular do eixo do DHR-3.

Atualizando a equação 3-1 com os parâmetros desenvolvidos, temos:

$$\mu = \frac{\bar{\sigma}_F}{\bar{\sigma}_N} = \frac{2\bar{R}M(R_{ext}^2 - R_{int}^2)}{F_N(R_{ext}^4 - R_{int}^4)} = \frac{M}{F_N} \frac{R_{ext} + R_{int}}{R_{ext}^2 + R_{int}^2} \quad (3-8)$$

Assim, são conduzidos os cálculos dos parâmetros para os principais testes de caracterização da tribo-reometria.

3.5.1

Curva de *Stribeck*

Realiza-se a varredura do coeficiente de atrito em função da velocidade de deslizamento, mantendo a força normal ajustada para um valor fixo. No entanto, devido à complexidade da dinâmica do experimento, que envolve fluxos de potência em duas dimensões espaciais distintas, a precisão na medição da força normal pode ser afetada, embora não comprometida. A margem de erro é mais significativa na força axial em comparação com a velocidade de deslizamento, uma vez que o reômetro é projetado prioritariamente para análises reológicas focadas no movimento predominantemente horizontal.

A varredura foi analisada de forma logarítmica com valores ω mínimos equivalentes a $4 \cdot 10^{-3}$ rad/s e máximos iguais a 60 rad/s. Porém, na maioria dos testes, esses valores limites não foram atingidos.

3.5.2

Steps de forças normais com velocidade fixa

Com o objetivo de enriquecer os dados relacionados ao coeficiente de atrito, realiza-se uma varredura em função de outra dimensão. Diferentemente da abordagem convencional da curva de *Stribeck*, opta-se por manter uma velocidade fixa, escolhida estrategicamente. E é feita a realização de degraus progressivos e regressivos da força normal.

Inicialmente, realiza-se um *pre-shearing*⁽¹⁷⁾ para garantir estabilidade e reprodutibilidade, evitando comportamentos transientes em relação à quantidade de amostra durante os testes. A estratégia é aplicar um ponto de teste inicial em 3N e depois inicia-se o procedimento.

Os testes foram conduzidos iniciando com uma força normal de 1N, progressivamente incrementada em passos de 1N até o limite máximo de 10N. Após atingir o valor máximo, a força foi reduzida gradualmente em etapas equivalentes até retornar ao valor inicial. Em cada estágio, os dados foram coletados em intervalos de

60 segundos, com a frequência de aquisição de dados de um valor por segundo, garantindo consistência e precisão no registro das informações experimentais, como ilustrado pela figura 3.16.

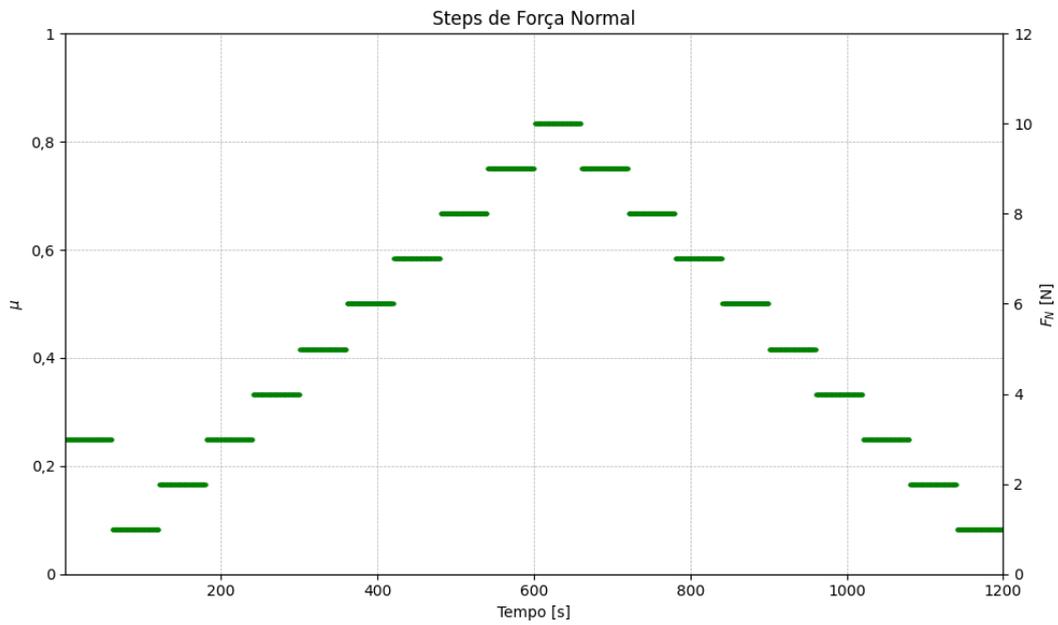


Figura 3.16: Steps de forças normais

4

Resultados

A apresentação dos resultados foi estruturada em duas etapas. Na primeira parte, exibem-se resultados específicos com o objetivo de desenvolver e testar a metodologia apropriada para a validação dos testes. Na segunda etapa, após a validação e definição dos métodos específicos de teste, foi realizada uma comparação sistemática entre diferentes fluidos de trabalho e materiais de superfície. O foco principal foi simular aplicações reais de fluidos de perfuração, avaliando o desempenho lubrificante das adições de óxido de grafeno e sal. Buscou-se identificar o impacto dessas adições nas propriedades tribológicas dos fluidos com as suas aplicações.

4.1

Primeira sessão de testes

Nesta seção, foi utilizado apenas um tipo de fluido de trabalho e apenas uma geometria inferior (a resina), permitindo um controle maior sobre as variáveis analisadas. O objetivo principal foi explorar a máxima variedade de condições experimentais, realizando ajustes sistemáticos e avaliações detalhadas para o desenvolvimento da metodologia. Cada variação nos testes foi criteriosamente avaliada, incluindo ajustes no intervalo de velocidades de deslizamento e análises baseadas na progressão da força normal.

Além disso, examinou-se a mudança de comportamento da curva de *Stribeck* ao comparar os testes realizados em sentidos distintos, como progressões crescentes e decrescentes de força normal, visando identificar possíveis discrepâncias nos regimes de lubrificação e refinar o processo experimental. Algumas tentativas foram feitas para incluir outras variáveis, como o controle da temperatura, porém, empecilhos técnicos limitaram a exploração completa dessa variável nesta etapa dos testes.

4.1.1

Curva de *Stribeck* demonstração de 3N

Inicialmente, foi introduzida a projeção da curva de *Stribeck* como parte da primeira bateria de testes, com a finalidade de demonstrar e identificar os diferentes regimes da teoria. A carga axial inicial foi definida em 3 N, com base em referências da literatura que apontam esse valor como padrão em experimentos similares. Os

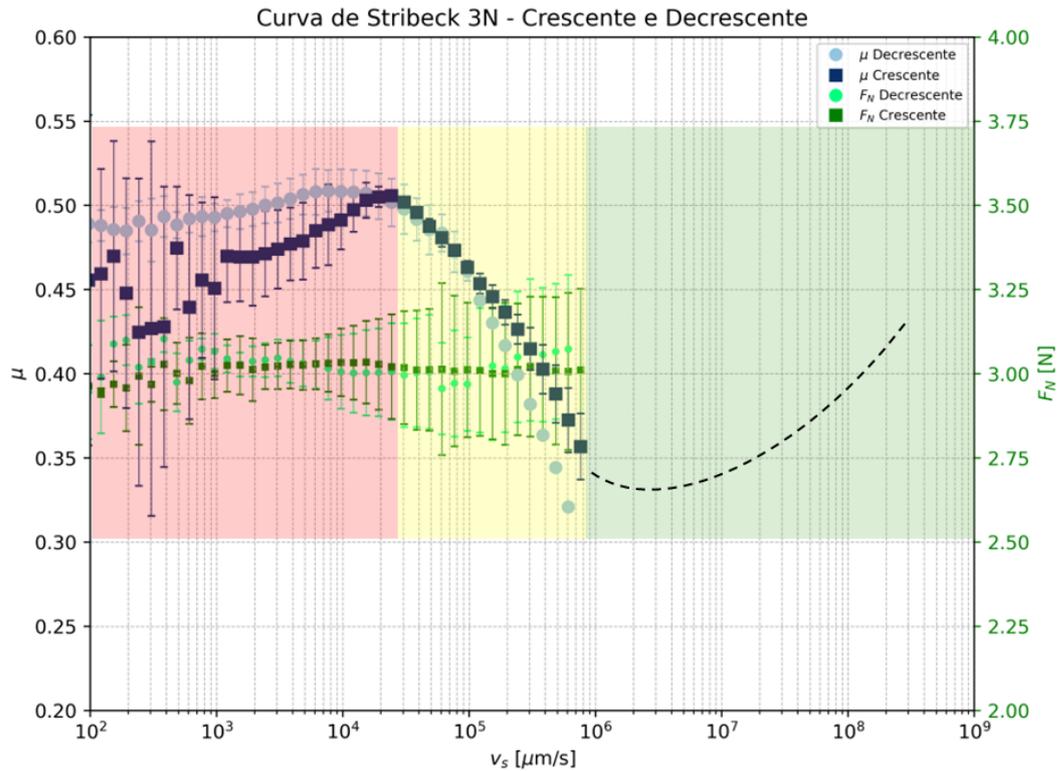


Figura 4.1: Curva de *Stribeck* de 3N com a representação dos regimes de lubrificação

valores de velocidade de deslizamento foram determinados considerando os limites técnicos do reômetro híbrido DHR-3, garantindo que os parâmetros empregados estivessem perto de sua capacidade operacional.

Além disso, duas abordagens distintas foram implementadas, testando diferentes sentidos de variação da velocidade angular: o sentido crescente ($\omega = 0,004 \rightarrow 50$ rad/s) e o decrescente ($\omega = 50 \rightarrow 0,004$ rad/s).

Observa-se uma clara semelhança com a curva clássica de *Stribeck*, onde as diferentes regiões de lubrificação são representadas por cores distintas: vermelho, amarelo e verde, correspondendo, respectivamente, à região de lubrificação limite, região de lubrificação mista e região hidrodinâmica. Realiza-se um esboço para a visualização da possível região hidrodinâmica.

Baseando-se na equação 2-1, o número de *Gumbel* (representado por Gu) apresenta um aumento de valor, uma vez que é diretamente proporcional à elevação da velocidade de deslizamento.

É importante ressaltar que, para elaborar o esboço comparativo da curva clássica, adotou-se a hipótese de que o fluido em análise apresenta comportamento newtoniano, em conformidade com a teoria que embasa a curva clássica de *Stribeck*. No

entanto, ainda não se conhece plenamente a influência independente da viscosidade na formação da curva, especialmente na região hidrodinâmica. Por essa razão, a única variável considerada para este esboço foi a velocidade de deslizamento, mantendo as demais condições experimentais constantes para avaliar exclusivamente o impacto dessa variável. Por isso, este esboço tracejado é meramente ilustrativo.

4.1.2

Curva de *Stribeck* de 1N

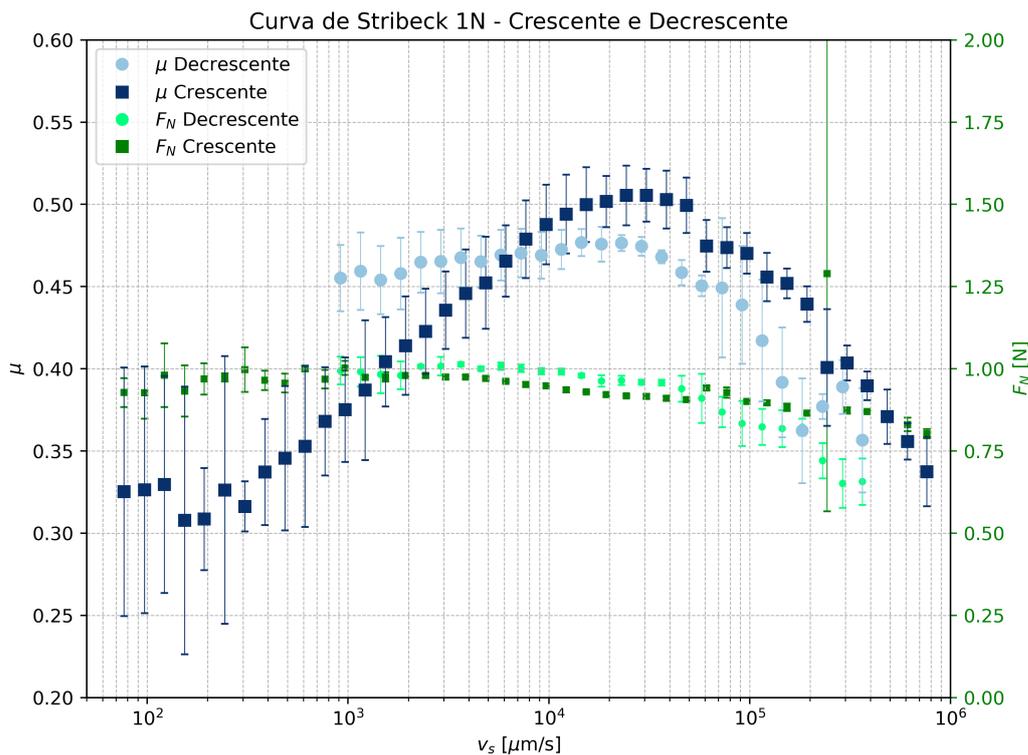


Figura 4.2: Curva de *Stribeck* de 1N decrescente e crescente

A próxima etapa do experimento consiste na aplicação de uma força normal fixada em 1 N. Em diversos testes, a curva correspondente apresentou problemas técnicos que dificultaram a obtenção de resultados conclusivos. Esses problemas são evidenciados pelo elevado índice de erro observado no gráfico da Figura 4.2, que ilustra as inconsistências associadas à força normal nessa condição, principalmente para velocidades elevadas.

Os valores obtidos para 1 N não foram os mais representativos em função da baixa repetibilidade dos resultados. No entanto, a análise da sensibilidade do atrito em relação à força normal ainda se mostra relevante.

Essa relação é destacada na Figura 4.3, em um gráfico com a carga normal de 1N demonstrando os valores individuais para testes com o sentido decrescente.

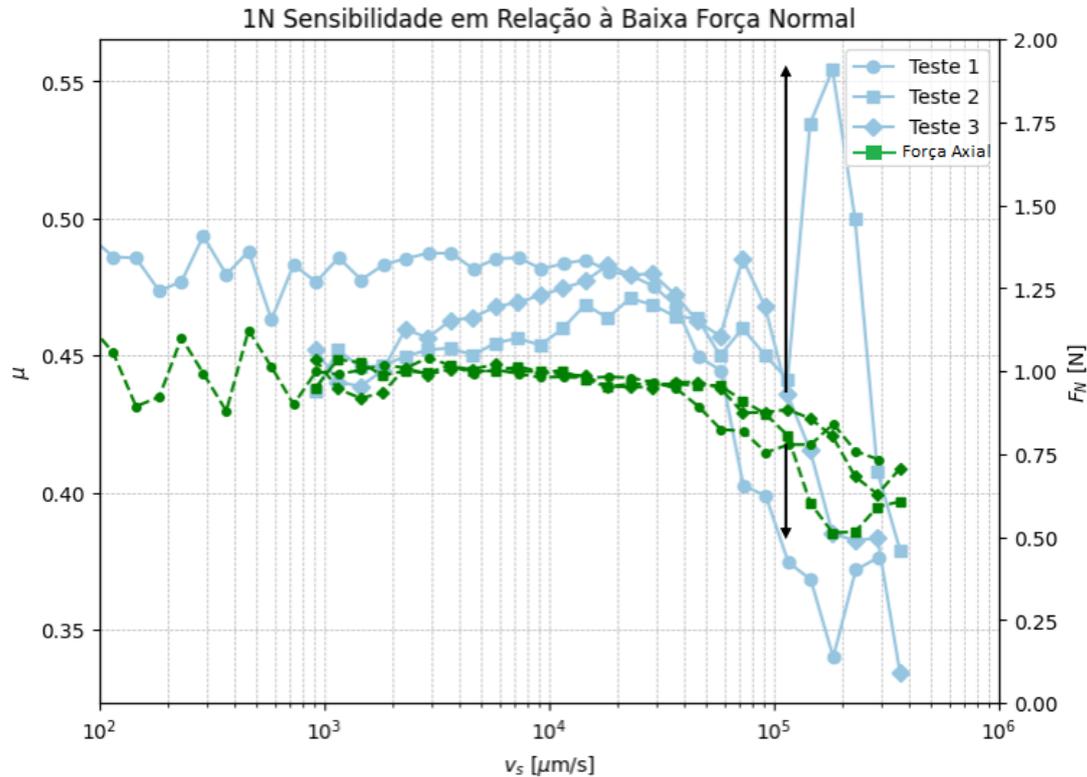


Figura 4.3: Curva de *Stribeck* de 1N decrescente

A alta sensibilidade em relação à variação relativa da força normal impressiona. Com uma variação de 0,3N (30%), indicado pela seta para baixo, houve um aumento absoluto repentino do coeficiente de atrito em 0,12, em relação a velocidades menores. O teste identificado na figura em questão não foi validado por conta da discrepância dos dados. Em suma, testes realizados com forças normais inferiores a 3 N estão sujeitos a uma maior sensibilidade experimental, o que compromete a confiabilidade e a precisão dos dados dos testes tribo-reométricos.

4.1.3

Curvas de *Stribeck* 5N e 7N decrescente

Diversos discos de resina foram impressos em 3D com o objetivo de garantir a reprodutibilidade dos testes e minimizar o desgaste ao longo dos ensaios. No entanto, o processo de impressão 3D, por sua natureza, apresenta limitações em nível microscópico, resultando em uma baixa uniformização nessa escala.

Como consequência, os diferentes discos de resina apresentaram nivelamentos e rugosidades distintas, mesmo sendo fabricados com o mesmo material. Por

consequente, os testes realizados com forças normais de 5N e 7N evidenciaram essas diferenças, demonstrando que as variações na rugosidade influenciam significativamente as curvas de *Stribeck* obtidas. Conclui-se que os resultados apresentados destacam o impacto das características superficiais dos materiais na resposta tribo-reométrica, mesmo mantendo-se o material da base. Com isso, enfatiza-se a importância do controle preciso na fabricação dos discos para essas análises comparativas.

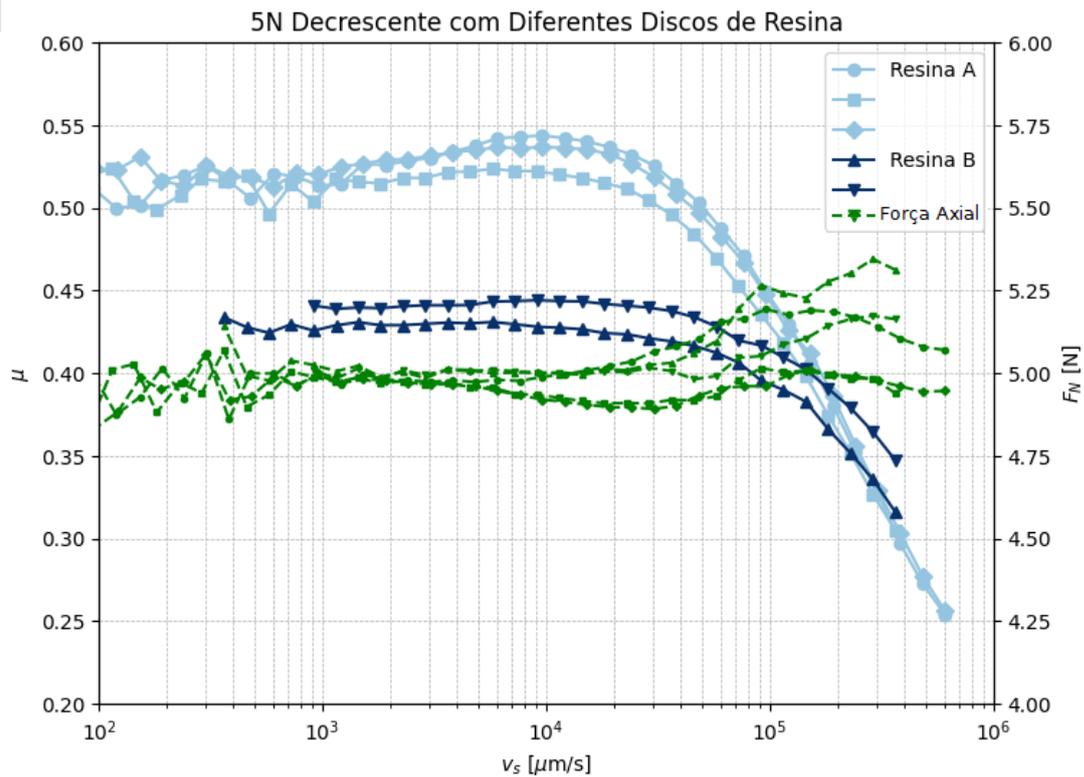


Figura 4.4: Curva de *Stribeck* de 5N decrescente

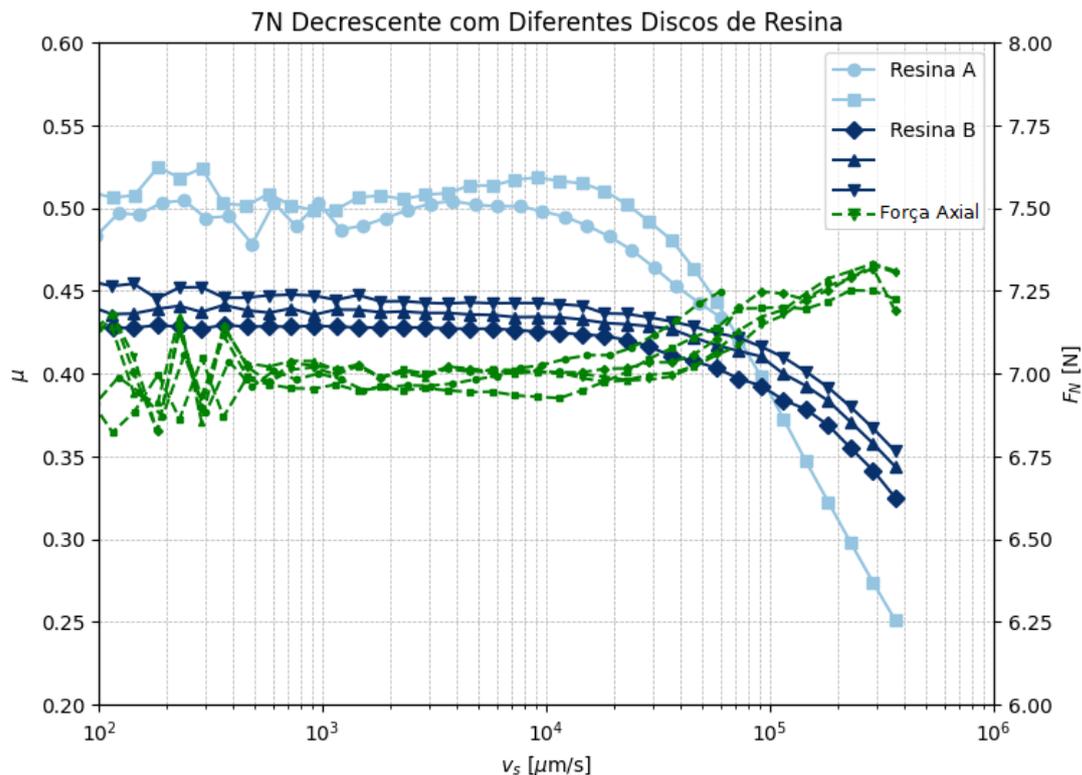


Figura 4.5: Curva de *Stribeck* de 7N decrescente

Os dois gráficos evidenciam um padrão claro. A resina A, utilizada recentemente e empregada nos testes, apresentou valores mais elevados na região limite, variando entre 0,50 e 0,55. Em contrapartida, os testes realizados com a resina B, mais antiga, exibiram valores inferiores na mesma região, situando-se entre 0,40 e 0,45.

4.1.4

Curvas de *Stribeck* 10N crescente e decrescente

Em todos os testes realizados até o momento, a higienização completa da geometria foi seguida rigorosamente, e nenhuma amostra foi reaproveitada para testes subsequentes. Em projetos anteriores com fluidos à base de óleo, a limpeza também foi cuidadosamente executada devido à alta volatilidade desses fluidos, que resultava em perdas inevitáveis. No entanto, pela baixa volatilidade do fluido utilizado no atual projeto, foram realizados experimentos para avaliar a reprodutibilidade utilizando a mesma amostra, e os resultados demonstraram viabilidade até duas repetições, com as amostras ainda apresentando comportamento reprodutível.

Observa-se, na realização dos testes em 10N, diferentes resultados entre fluidos novos e fluidos reaproveitados.

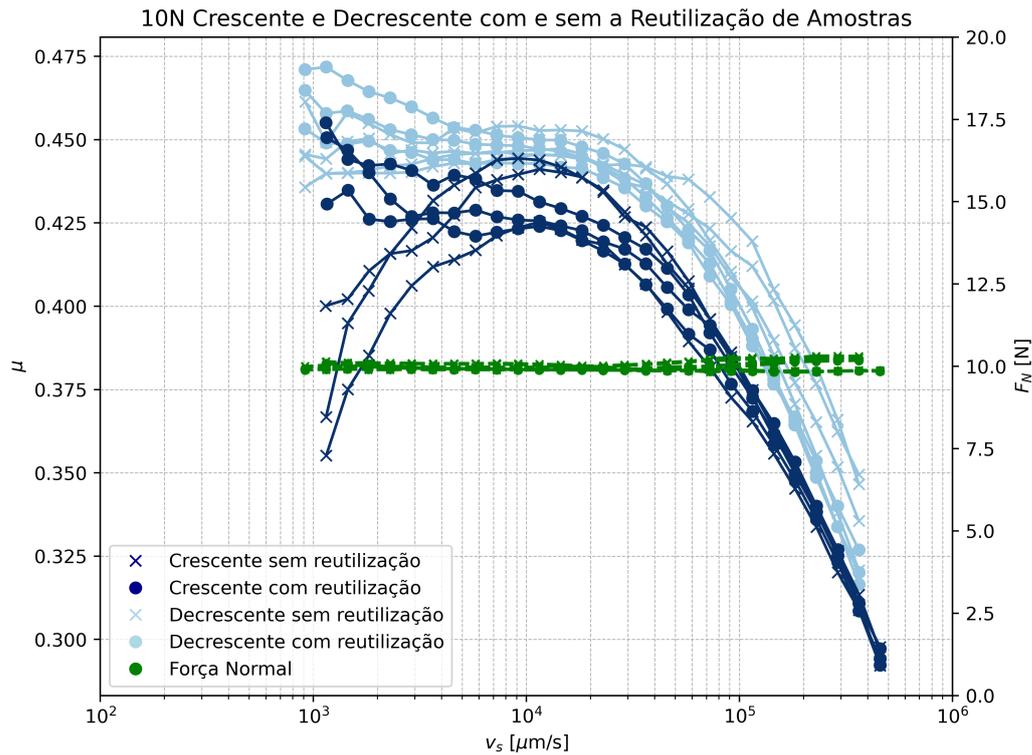


Figura 4.6: Curva de *Stribeck* de 10N e reutilização de amostras

A incompatibilidade entre as curvas nos sentidos crescente e decrescente foi mais evidente no início dos testes, especialmente quando as amostras não eram reaproveitadas. Nas velocidades menores, a curva crescente com fluidos reaproveitados e ambas as curvas decrescentes refletiam valores mais consistentes, alinhando-se ao comportamento esperado da curva teórica. Por outro lado, na curva crescente, com amostras novas, observou-se um desvio do comportamento constante previsto, indicando um impacto significativo da reutilização e do preparo inicial das amostras sobre os resultados obtidos.

Em curvas decrescentes, também avaliou-se o mesmo comportamento em velocidades altas. Há um desvio com fluidos novos em relação a curvas com fluidos reaproveitados e também às curvas com o sentido crescente.

A análise do reaproveitamento de amostras evidenciou a importância da realização de um *preshearing*, ou seja, a pré-utilização da amostra no reômetro antes do início dos testes.

4.1.5

Curvas de *Stribeck* com 12N, 15N e 18N

Outros testes foram realizados mantendo a mesma metodologia desenvolvida até o momento, com a variação da força normal aplicada.

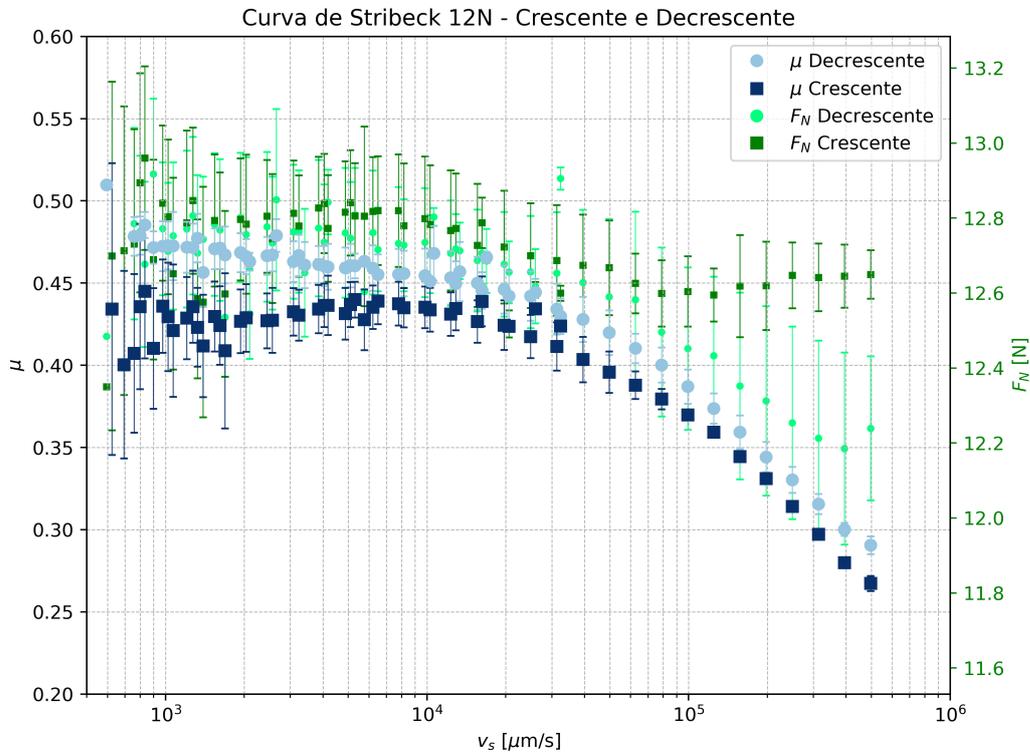


Figura 4.7: Curva de *Stribeck* de 12N crescente e decrescente

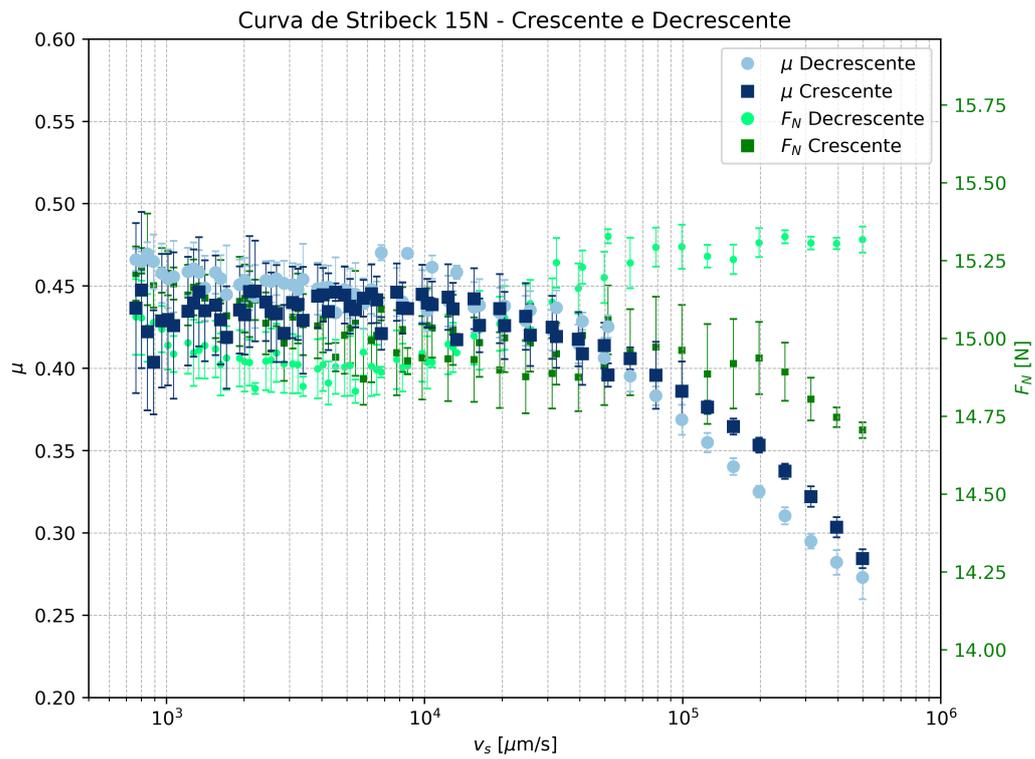


Figura 4.8: Curva de *Stribeck* 15N crescente e decrescente

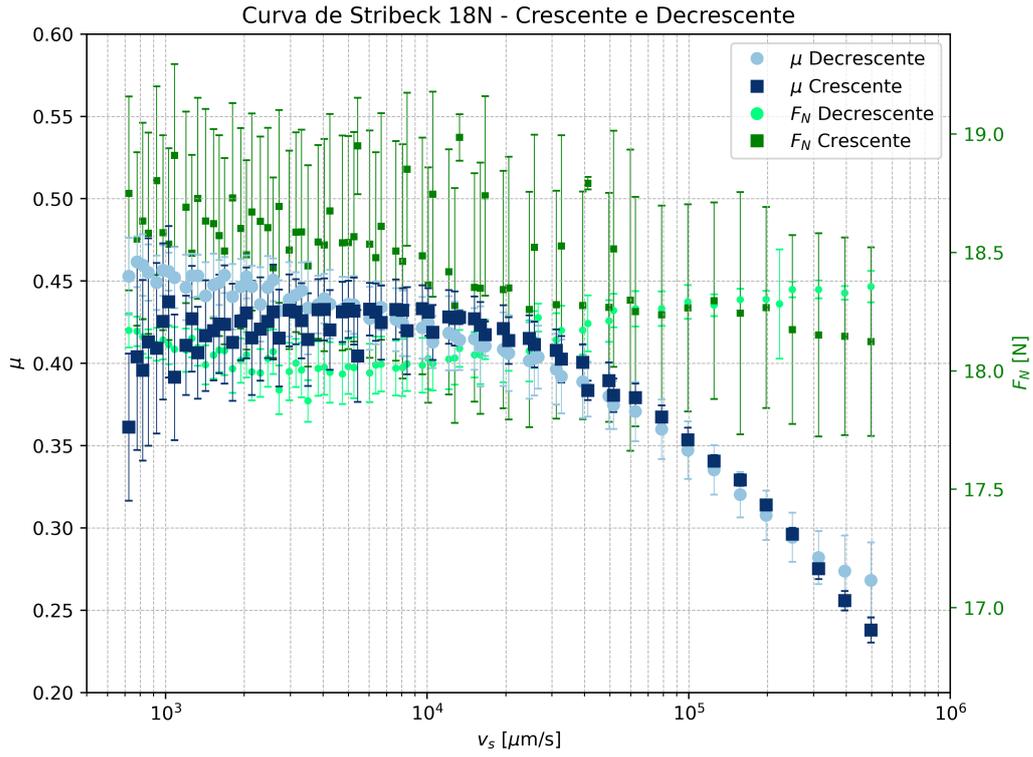


Figura 4.9: Curva de *Stribeck* de 18N crescente e decrescente

4.1.6

Gráfico combinando todas as forças axiais

Todas as curvas apresentadas foram submetidas ao mesmo gráfico. Adotou-se o sentido decrescente como o padrão, pela maior confiabilidade dos dados.

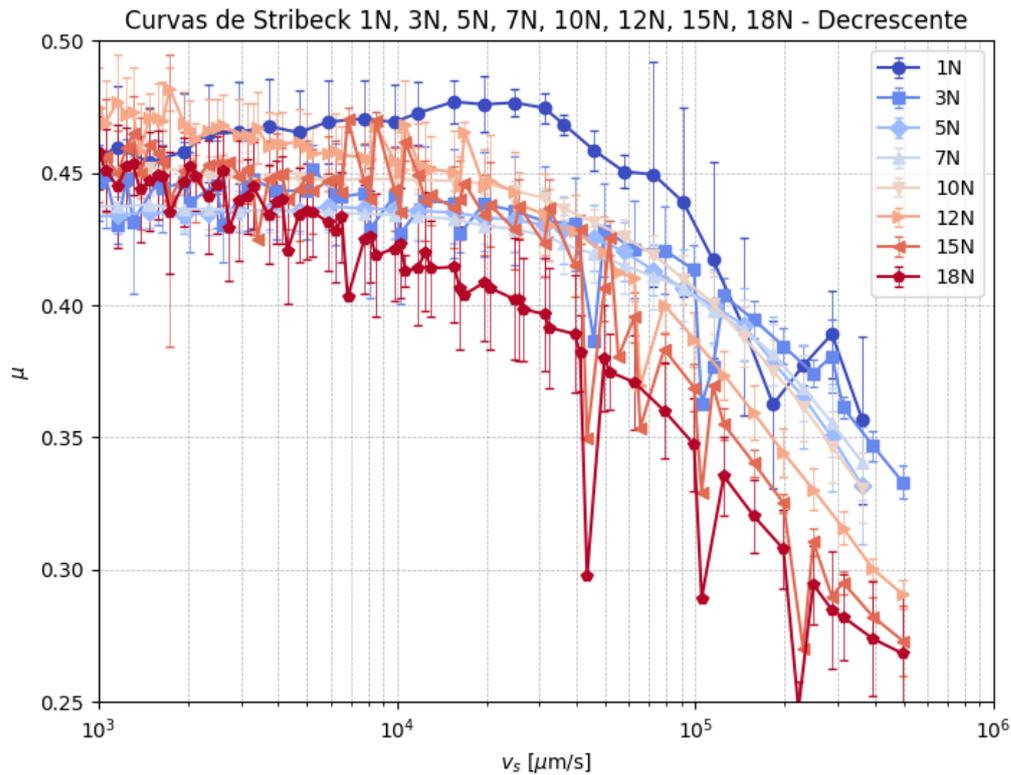


Figura 4.10: Curva de *Stribeck* comparativas entre as diferentes forças normais

A identificação de um padrão nas velocidades mais baixas é complexa devido à aleatoriedade de dados. Entretanto, para velocidades de deslizamento superiores a $10^5 \mu\text{m/s}$, verifica-se uma tendência clara: os coeficientes de atrito apresentam valores menores conforme a força normal aumenta, indicando uma relação direta entre maior carga e redução do atrito em regimes de velocidade mais elevada.

4.1.7

Step de forças normais

Para uma análise mais detalhada desses valores, considerando uma faixa ampliada de forças normais, foi desenvolvido outro tipo de teste, o *Steps* de forças normais. Esse método permitiu avaliar o comportamento tribológico em diferentes níveis de carga de forma mais estruturada e minuciosa, com enfoque na influência da força normal. Para a análise, foram selecionados três valores (7,5 rad/s, 15 rad/s e 30 rad/s) elevados de velocidade de deslizamento, escolhidos estrategicamente para investigar as tendências em regimes de alta velocidade.

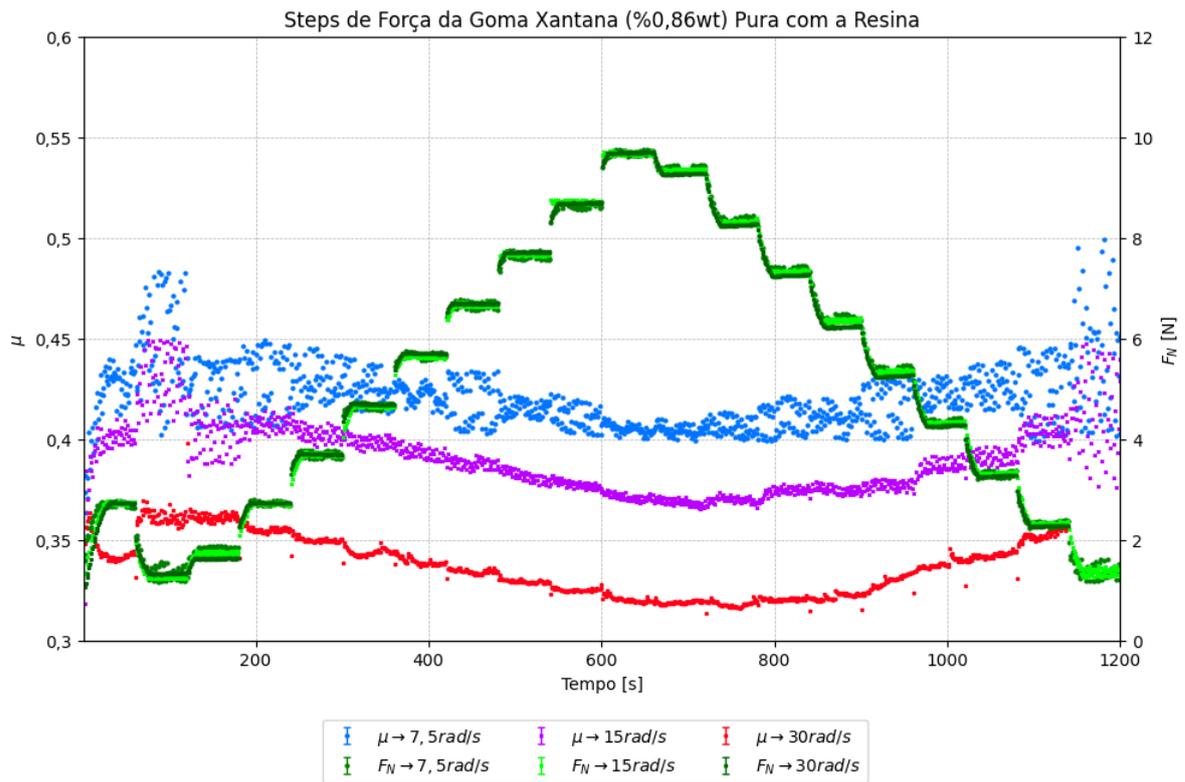


Figura 4.11: Steps de forças normais com velocidades altas

O gráfico confirma a análise feita nas curvas de *Stribeck* unificadas. Quando maior a força normal, menor é o coeficiente de atrito para velocidades elevadas.

4.1.8 Limitações técnicas

Em alguns casos, os testes foram interrompidos devido a um brusco incremento na força normal, resultado de um atrito significativo na geometria inferior. Esse desgaste comprometeu a integridade dos testes, fazendo com que a geometria superior se desprendesse do eixo do motor. Esse comportamento inesperado levou a um súbito aumento da força normal, inviabilizando a continuidade dos ensaios.

O objetivo do experimento na primeira parte foi analisar diferentes tipos de condições associadas. Entretanto, em algumas dessas condições, esse empecilho técnico apareceu. Por exemplo, esse evento ocorreu com velocidades altas, a partir de 5 rad/s.

Na utilização da geometria superior *half-ring*, imediatamente após o começo dos testes em ordem decrescente, e no meio dos testes em ordem crescente, o problema técnico surgiu, inviabilizando o prosseguimento desses testes específicos.

O mesmo ocorreu para as geometrias inferiores de alumínio. Diversos discos de alumínio inutilizados para testes estavam disponíveis, sendo estes ideais para serem a geometria inferior padrão para os experimentos. Infelizmente, pela baixa dureza do material, em questão de segundos, o desgaste ocorreu e causou o aumento súbito da força normal, impossibilitando sua utilização.

Testes em diferentes temperaturas também estavam planejados para esta pesquisa. No entanto, o alumínio foi o único material utilizado que apresentava alta condutividade térmica, condição essencial para uma troca de calor eficiente com o fluido de trabalho. O controle térmico é realizado pela placa *Peltier*, que regula a temperatura por meio da geometria inferior. Essa geometria, por sua vez, transfere o calor para o fluido em contato. Contudo, materiais como resina, nylon e acetal possuem baixa condutividade térmica, tornando-se inviável alcançar as temperaturas desejadas para os testes. Em casos envolvendo esses materiais, as temperaturas dos fluidos de trabalho, após o controle dos *Peltiers*, apresentavam variações de apenas 5°C acima ou abaixo da temperatura ambiente, insuficientes para simular condições experimentais pertinentes, como exemplo, 4°C (temperatura do fundo do mar) e 60°C (temperatura que apresenta queda brusca na viscosidade do fluido).

4.2

Segunda sessão de testes

Na segunda etapa, a análise foi conduzida mantendo os mesmos critérios de condicionamento de teste, porém com a substituição do fluido de trabalho e das geometrias inferiores associadas.

4.2.1

Testes na geometria inferior de nylon

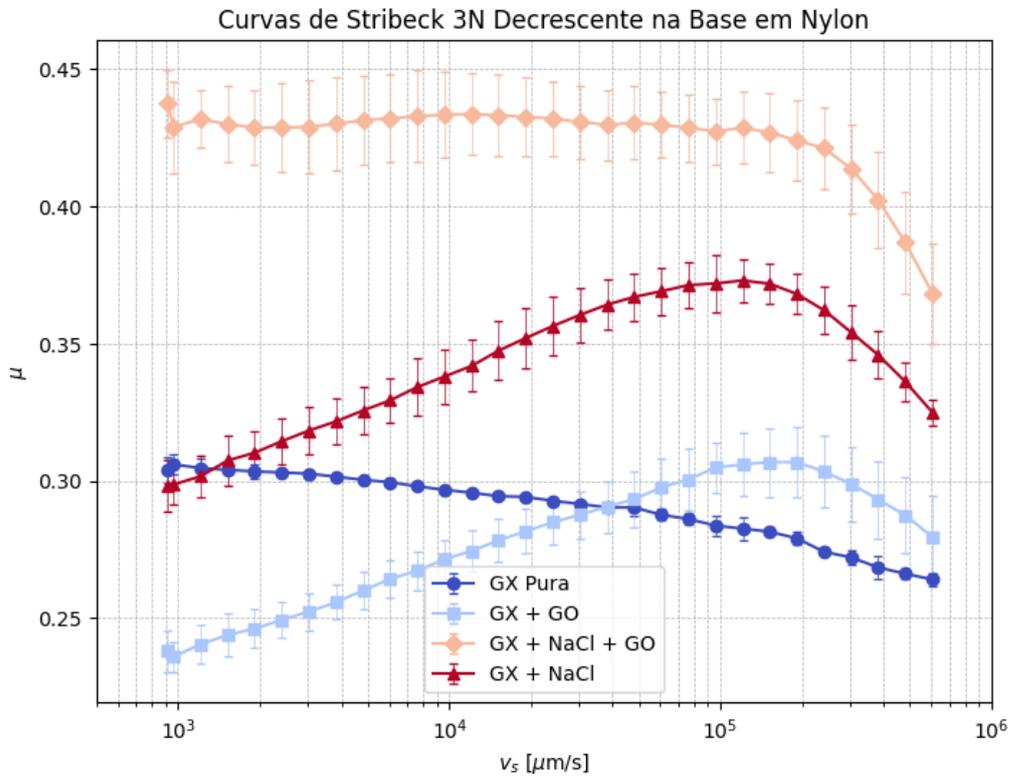


Figura 4.12: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes amostras em nylon

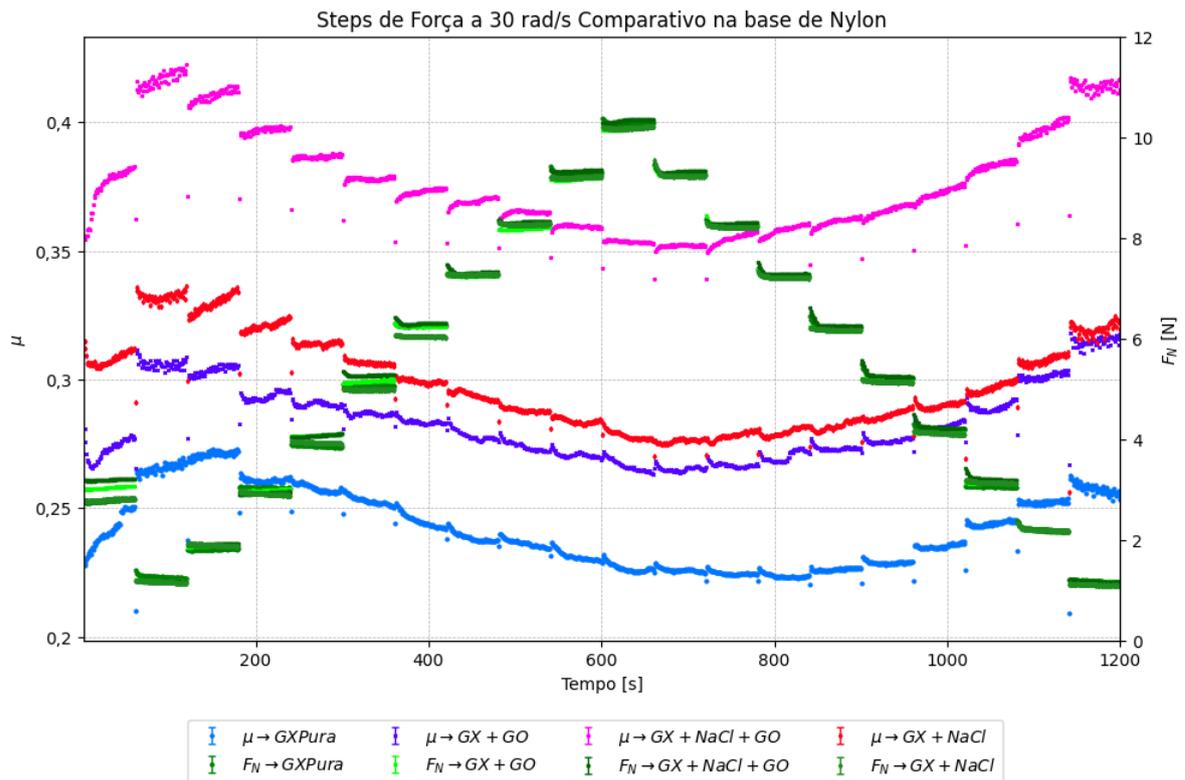


Figura 4.13: Steps de força normal em 30 rad/s entre diferentes amostras em nylon

Na curva de *Stribeck*, observa-se que a adição exclusiva de óxido de grafeno atua como um lubrificante eficiente em baixas velocidades, contribuindo para a redução do atrito nesse regime. Por outro lado, a combinação de sal com óxido de grafeno influencia, significativamente, aumentando o coeficiente de atrito, sugerindo uma interação entre os componentes que altera as propriedades tribológicas do fluido de forma notável. A adição de sal, em comparação à goma xantana pura, também é identificada como um fator prejudicial para a lubrificação do fluido, principalmente para velocidades mais elevadas, onde a interação entre as superfícies de contato é menos dominante para a cinemática do sistema.

O teste, *Steps de Força*, permitiu uma análise mais detalhada em condições de alta velocidade de deslizamento. Os resultados demonstraram que, em velocidades maiores, a goma xantana pura apresenta a maior eficiência de lubrificação quando comparada à goma xantana com a adição de óxido de grafeno (GO). Além disso, não foi observada uma mudança significativa no padrão de comportamento entre as amostras com a variação da força normal. A mudança relativa no coeficiente de atrito, em função da força normal, mostrou-se equivalente para todas as amostras testadas, indicando uma resposta uniforme à variação dessa variável experimental.

4.2.2

Testes na geometria inferior de acetal

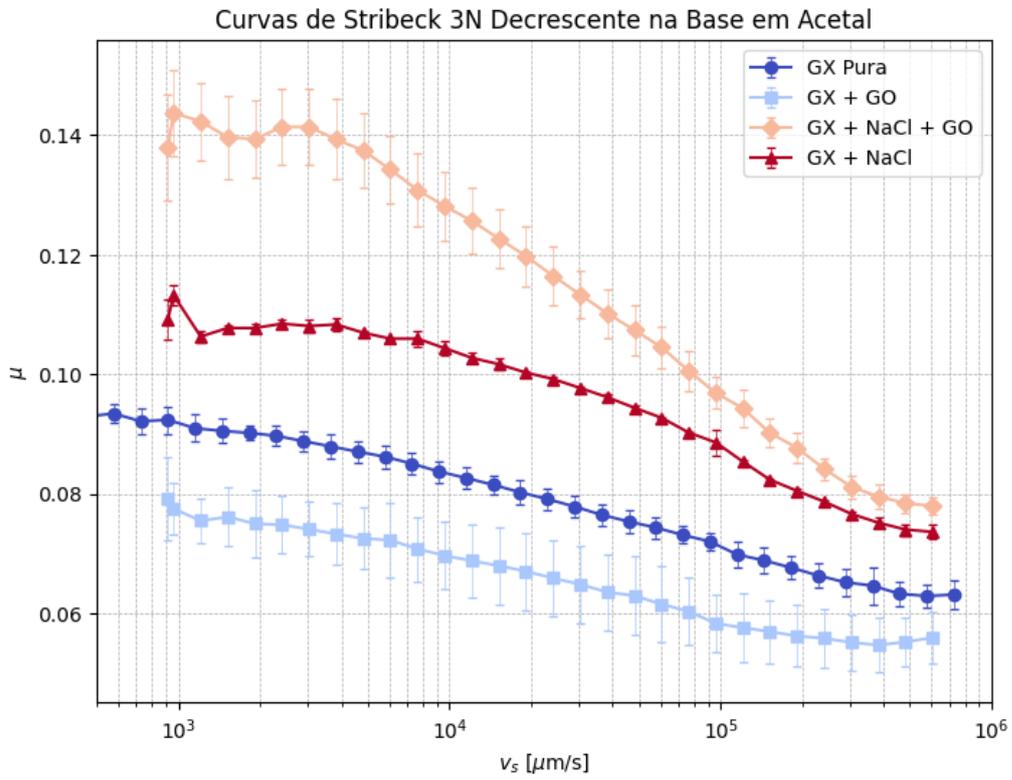


Figura 4.14: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes amostras em nylon

4.2.2.1 Steps de força com o acetal

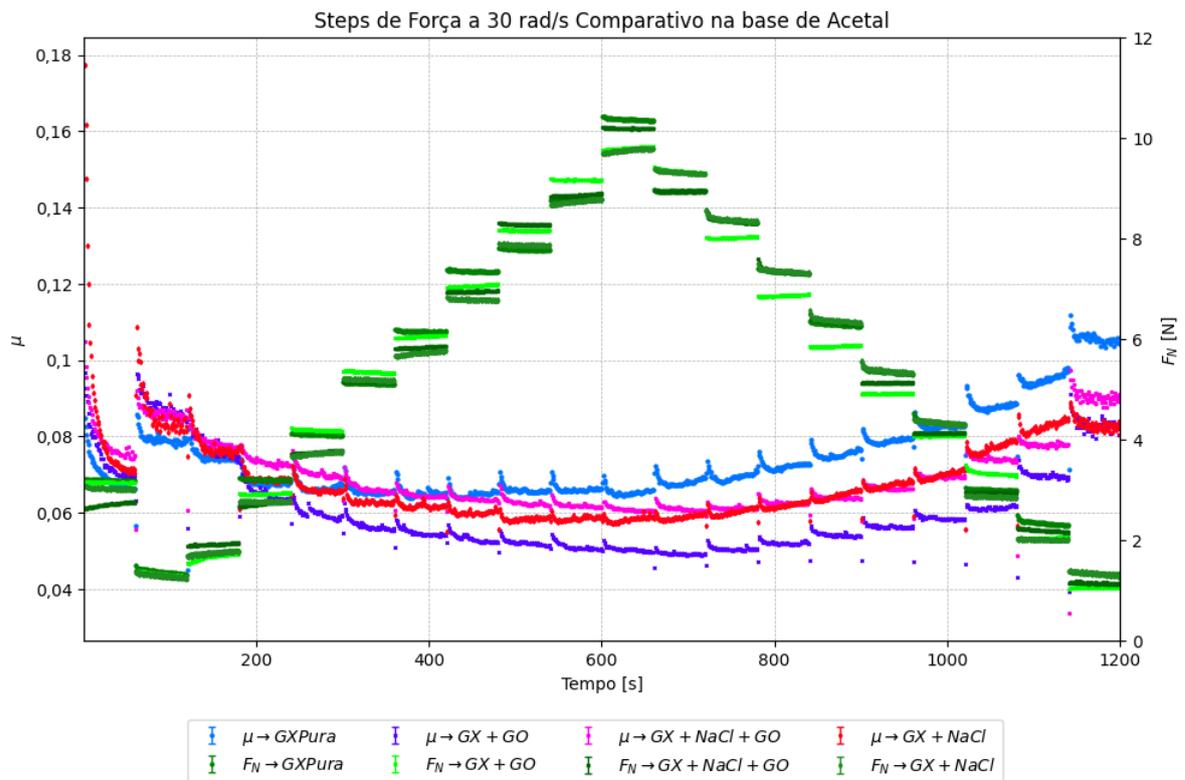


Figura 4.15: Steps de força normal em 30 rad/s entre diferentes amostras em nylon

No caso da geometria de acetal, destaca-se a influência positiva do óxido de grafeno (GO), que melhora as características de lubrificação do sistema. Em contrapartida, as outras duas combinações de aditivos apresentaram um impacto negativo, aumentando o atrito ao longo de todas as velocidades analisadas. Apesar disso, o coeficiente de atrito manteve-se estritamente baixo (inferior a 0,15) em todas as condições, o que pode ser atribuído às propriedades intrínsecas do acetal, um material que contribui significativamente para a lubrificação devido à sua natureza autolubrificante. O mesmo padrão ocorreu no teste de *steps* de forças axiais.

4.2.3 Testes na geometria inferior de resina

4.2.3.1

Curva de *Stribeck* com a resina

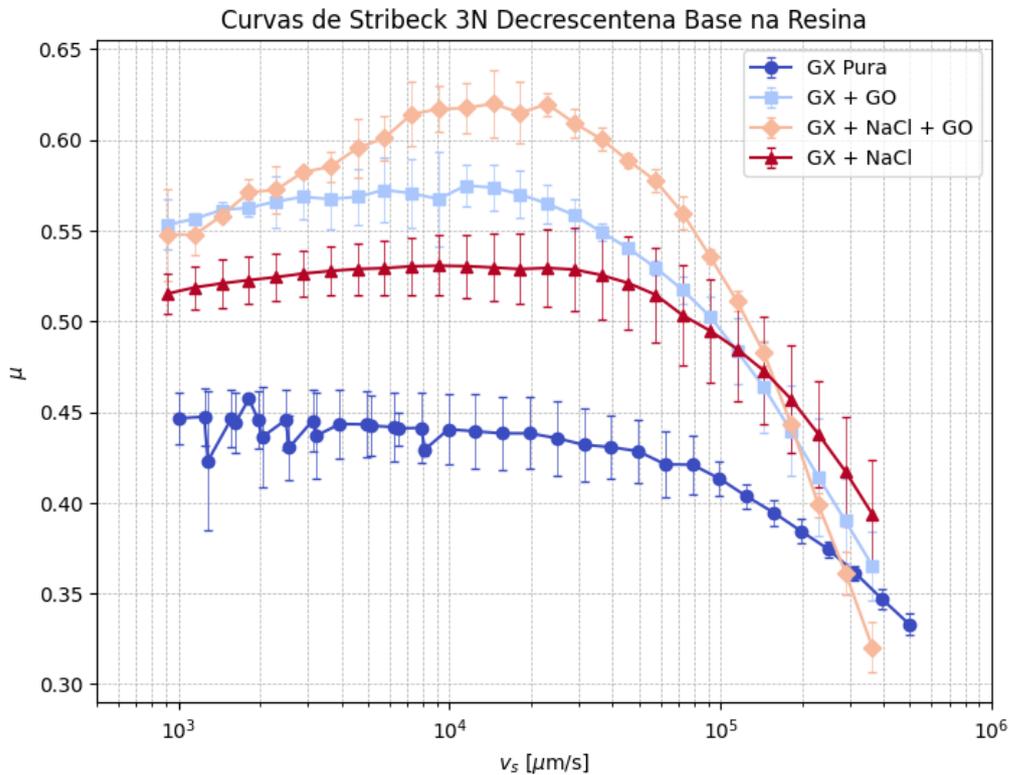


Figura 4.16: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes amostras na resina

Os resultados obtidos com a geometria de resina diferiram, significativamente, das outras geometrias. O coeficiente de atrito geral foi consideravelmente mais elevado, em comparação às outras geometrias, e nenhuma combinação de aditivos apresentou uma lubrificação superior à da goma xantana pura, com exceção da mistura contendo sal e óxido de grafeno em altas velocidades, o que representou um contraste em relação aos outros materiais testados.

Os testes de *Steps* de força normal, no entanto, não puderam ser concluídos por razão do desgaste acentuado da geometria de resina. Esse desgaste, descrito anteriormente, levou a interrupções frequentes nos ensaios, tornando inviável a continuidade dos experimentos nessa configuração.

4.2.4

Testes por fluido

Os mesmos dados foram reanalisados e apresentados com uma modificação na orientação dos gráficos, organizando-os em função de cada fluido, avaliando a influência de cada material.

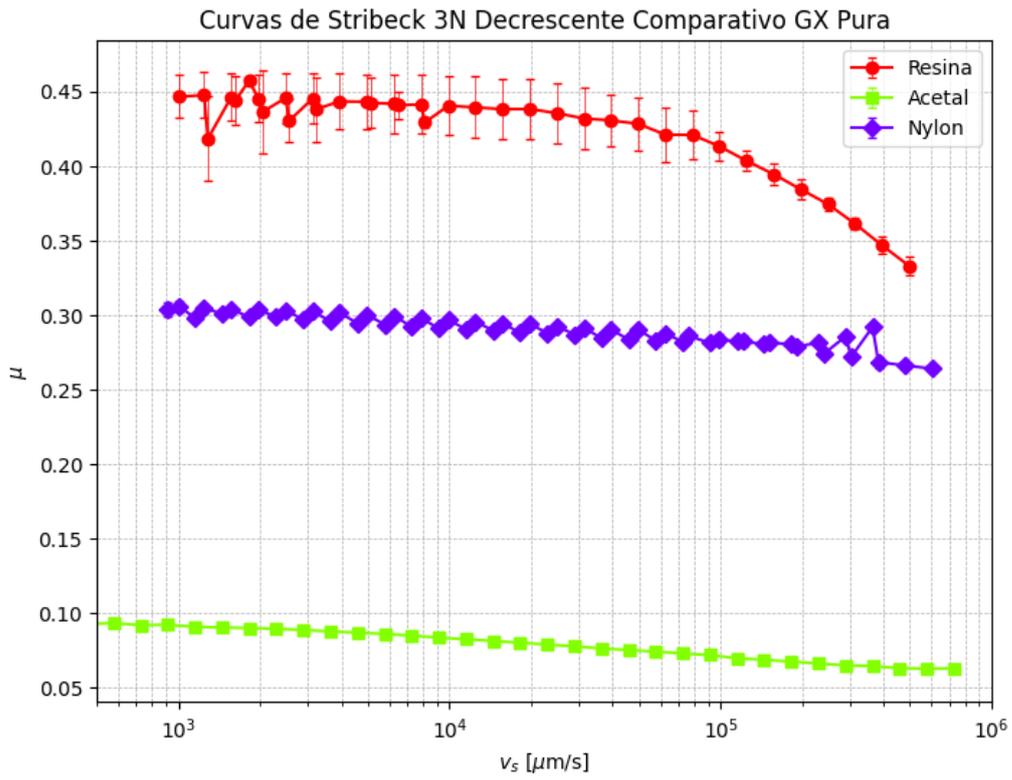


Figura 4.17: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX pura

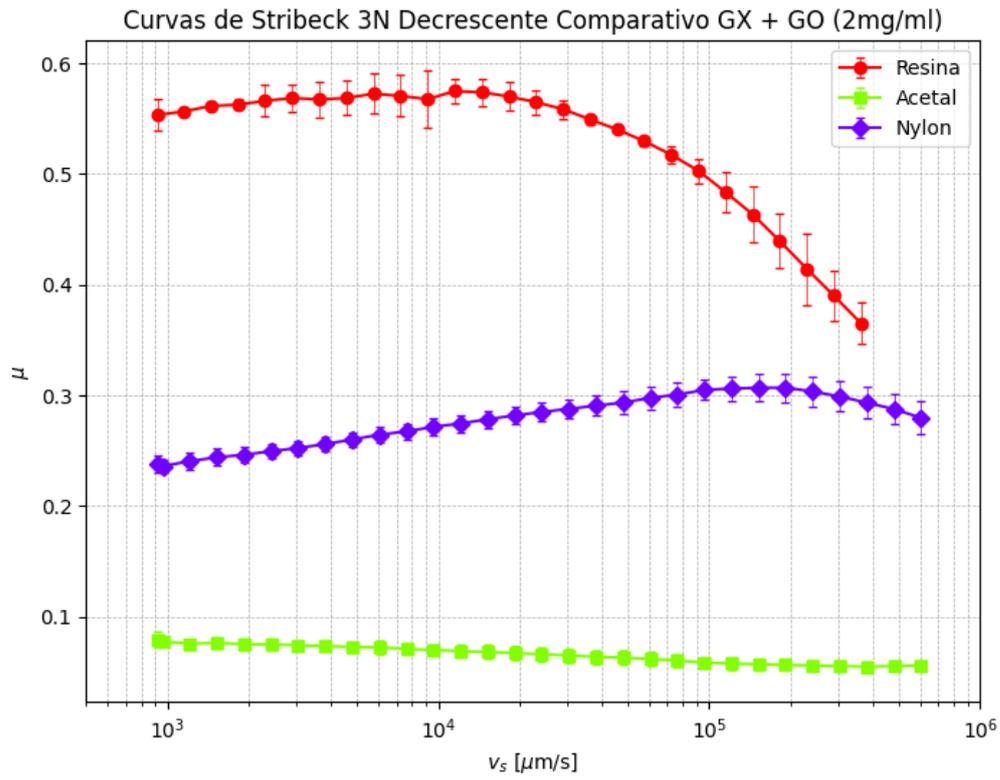


Figura 4.18: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adição de GO

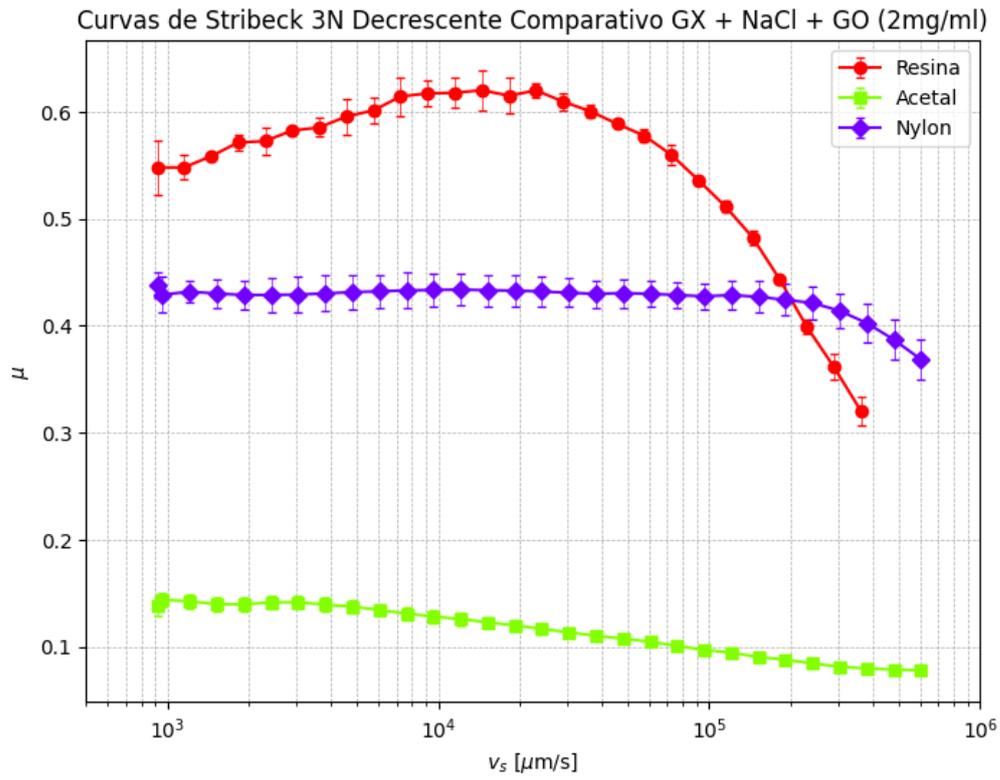


Figura 4.19: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adição de NaCl e GO

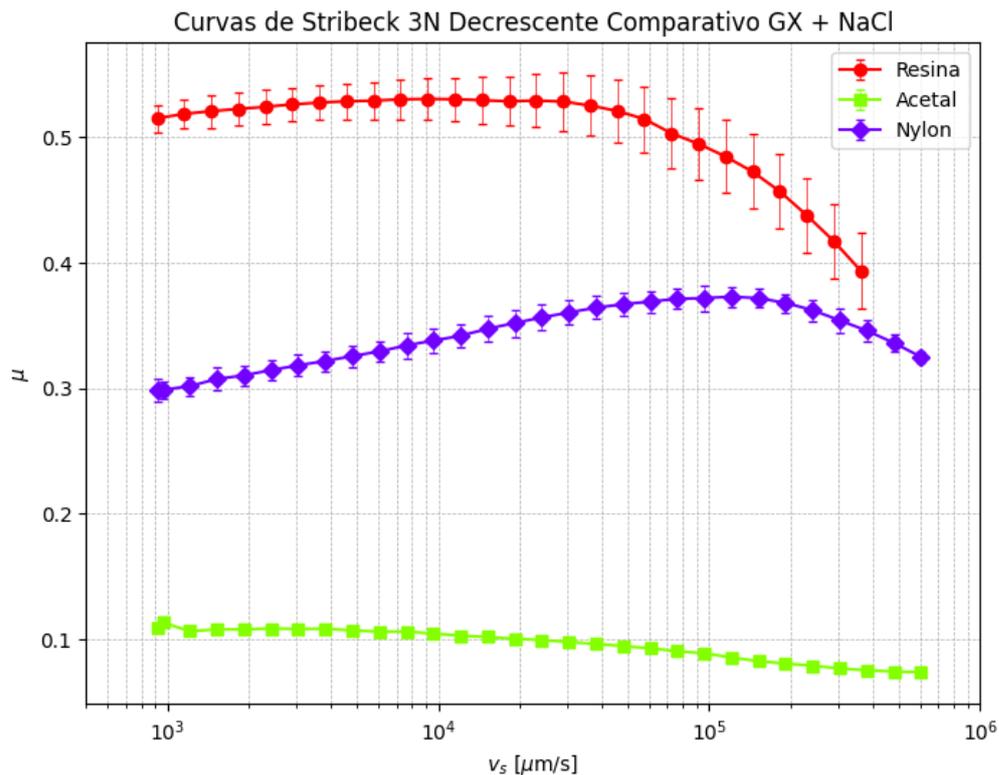


Figura 4.20: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com a GX com adição de NaCl

É evidente a influência de cada material nas propriedades tribológicas analisadas. A resina, devido à sua alta rugosidade superficial, apresenta naturalmente um coeficiente de atrito mais elevado em comparação aos outros materiais. Por outro lado, o Nylon possui um valor intermediário. E o Acetal exibe valores de atrito, drasticamente, menores para cada fluido, destacando-se como o material com o desempenho lubrificante mais eficiente.

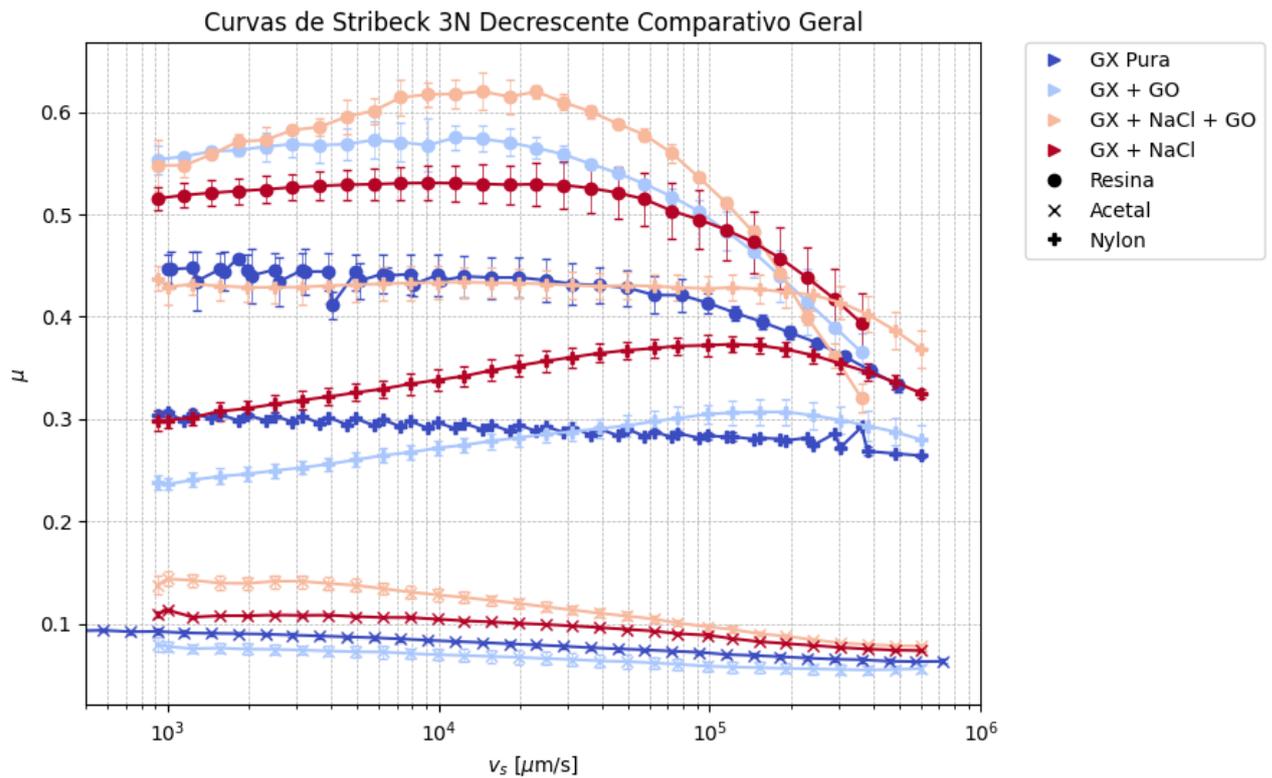


Figura 4.21: Curva de *Stribeck* 3N decrescente entre diferentes geometrias inferiores com todos os fluidos

4.3

Análise das imagens dos materiais nos microscópios

4.3.1

Microscópio óptico

Essa análise visual desempenhou um papel complementar nos experimentos, permitindo ilustrar os efeitos das condições de teste sobre os materiais sólidos. Embora não tenha sido realizada uma análise quantitativa detalhada, as imagens fornecidas pelo microscópio óptico foram suficientes para confirmar a ocorrência de desgaste e correlacioná-la com os parâmetros utilizados nos ensaios tribológicos e constitutivos.

O microscópio óptico foi empregado apenas para demonstrar o desgaste do disco de alumínio e as delimitações dos grãos devido ao desgaste. A mudança de cor reflete a profundidade e perda de material. As linhas, que não seguem o sentido tangencial, indicam a anisotropia do material no desgaste.

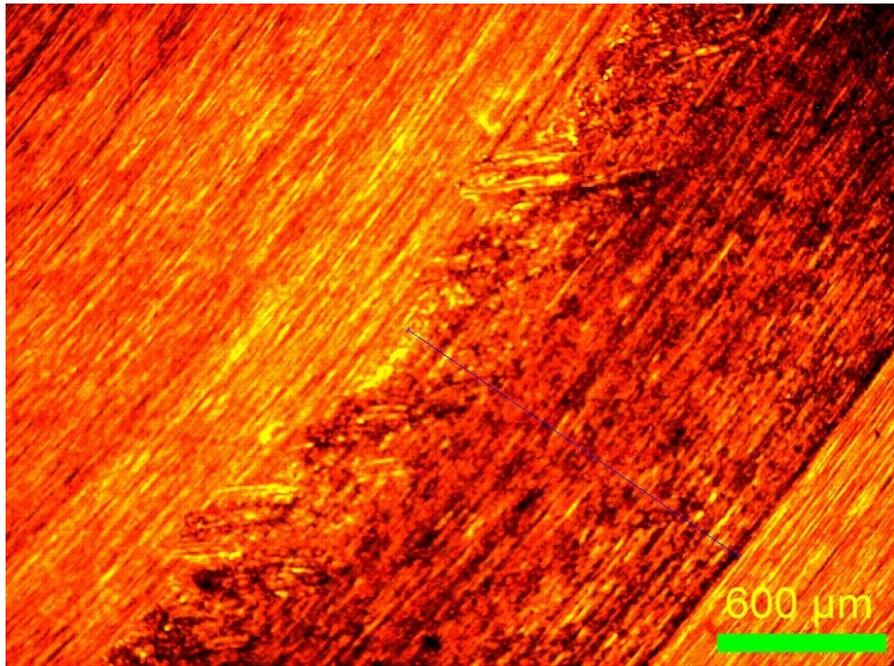


Figura 4.22: Imagem do disco de alumínio desgastado após testes

4.3.2 MEV

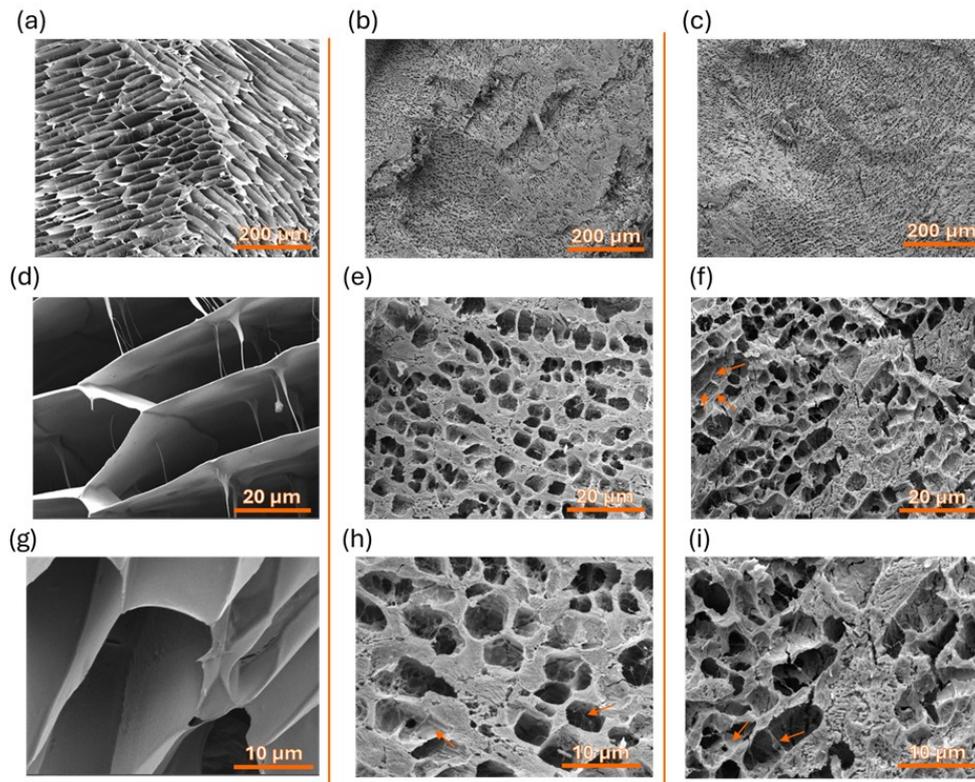


Figura 4.23: Micrografias de alta resolução de dispersões de goma xantana em diferentes ambientes: (a, d, g) dispersão de GX pura; (b, e, h) dispersão de GX em solução salina de 20% wt de NaCl; (c, f, i) dispersão de GX com 2 mg/mL de GO em solução de 20% wt de NaCl. As imagens foram coletadas em três escalas: 200 μm (a-c), 20 μm (d-f) e 10 μm (g-i).

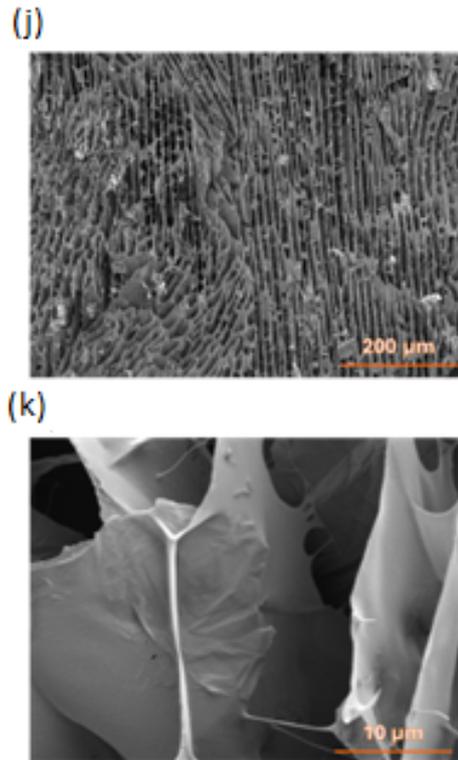


Figura 4.24: Micrografias de alta resolução de dispersões de goma xantana para: (j, k) dispersão XG com 2 mg/mL de GO. As imagens foram coletadas em duas escalas: 200 μm e 10 μm .

As soluções aquosas de NaCl apresentam um padrão microestrutural característico que também é observado em dispersões de goma xantana (GX), tanto na presença quanto na ausência de óxido de grafeno (GO), em ambientes salinos. Contudo, nesses sistemas, há um componente estrutural adicional nas camadas de solventes, associado às cadeias de goma xantana.

Uma comparação das imagens das últimas duas colunas não revela diferenças significativas entre as amostras em sal com e sem GO. Nas amostras com GO, as características estruturais são compatíveis com a presença de goma xantana, mas as nanofolhas de GO não são visíveis, possivelmente, em virtude da interação com íons hidratados. Todavia, um detalhe na parte superior esquerda da figura f destaca uma rede distinta, diferente das paredes de íons hidratados. Essa rede, formada por goma xantana e/ou GO, parece ser mais resistente que as estruturas baseadas em sal. Isso indica que as dispersões da goma em sal com GO formam redes mais robustas, explicando os valores mais altos de coeficiente de atrito.

Com a adição de óxido de grafeno (GO) vista na figura 4.24, há um aumento nos pontos de ligação física na rede, diminuindo o tamanho médio dos poros e criando uma estrutura mais uniforme. Essa rede mais densa e organizada reduz

irregularidades e aumenta a uniformidade na interface de contato, diminuindo a resistência ao deslizamento. O GO atua como um estabilizador, melhorando a suavidade da superfície e, conseqüentemente, reduzindo o coeficiente de atrito.

5

Conclusão e Trabalhos Futuros

Os resultados obtidos neste estudo permitiram uma análise detalhada das propriedades tribológicas de diferentes fluidos e materiais, destacando pontos cruciais sobre o desempenho dos sistemas avaliados. A alta sensibilidade observada para diferentes tipos de resina evidenciou o impacto significativo da rugosidade superficial no coeficiente de atrito, tornando a manutenção do mesmo material um fator crítico para garantir reprodutibilidade e resultados confiáveis.

Entre os fluidos analisados, a adição de óxido de grafeno (GO) mostrou ser um lubrificante eficiente no geral, com vantagens evidentes na maioria das condições experimentais. Em contrapartida, a adição de sal ao fluido revelou-se altamente prejudicial à lubrificação, decorrente da sua influência drástica na microestrutura, comprometendo a capacidade de redução do atrito. Características de lubrificação dos diferentes tipos de superfícies foram analisadas e verificadas, como, por exemplo, uma maior característica autolubrificante proveniente do acetal.

Após a realização de centenas de testes, este estudo trouxe contribuições notáveis para a literatura no campo, especialmente no que diz respeito ao desenvolvimento e à aplicação de uma metodologia ainda pouco explorada. Através de ajustes e refinamentos, foi possível não apenas validar a metodologia, mas também otimizar os parâmetros e condições experimentais, permitindo análises mais precisas e reprodutíveis.

Para trabalhos futuros, algumas direções importantes foram identificadas para aprofundar as análises e superar as limitações observadas. Primeiramente, a adoção de uma *master curve* da região hidrodinâmica pode ser explorada para comparar os resultados obtidos com a curva clássica de *Stribeck*, permitindo uma avaliação mais precisa e unificada das propriedades tribológicas. Além disso, seria relevante a calibração de uma curva reológica em condições de alta pressão, visando equiparar melhor os parâmetros de reologia e tribologia em experimentos subsequentes.

Outra abordagem recomendada é a utilização de um tribômetro, que possibilitaria alcançar velocidades de deslizamento maiores, ampliando o escopo dos testes e permitindo a investigação de regimes de lubrificação mais próximos do regime hidrodinâmico, realizando uma análise mais abrangente. Alternativamente, pode-se empregar um modelo de regressão para gerar uma *mastercurve* empírica, proporcionando uma representação matemática mais robusta dos resultados experimentais.

Por fim, explorar a variação de temperaturas em futuros trabalhos também é essencial, visto que o controle térmico influencia diretamente o comportamento reológico e tribológico dos fluidos, ampliando a aplicabilidade dos resultados em condições mais próximas das operacionais.

Referências bibliográficas

- [1] OVERNEY, R. M.. **Molecular tribology**.
- [2] JOHNSON, K. L.; KENDALL, K. ; ROBERTS, A.. **Surface energy and the contact of elastic solids**. Proceedings of the royal society of London. A. mathematical and physical sciences, 324(1558):301–313, 1971.
- [3] RABINOWICZ, E.. **Friction and wear of materials**, 1995.
- [4] SPIKES, H.; OLVER, A.. **Mixed lubrication—experiment and theory**. Tribology Series, 40:95–113, 2002.
- [5] XU, Y.; STOKES, J. R.. **Soft lubrication of model shear-thinning fluids**. Tribology International, 152:106541, 2020.
- [6] MERLINERD. **Drilling fluid rheology explained for drilling engineers**. <https://merlinerd.com/2022/03/31/drilling-fluid-rheology-explained-for-drilling-engineers/>, March 2022.
- [7] DEVARAJU, A.; RAJENDRAN, P.; PERUMAL, A. E. ; SARAVANAN, I.. **Investigation of temperature influence in wear studies on nitride coatings**. Materials Today: Proceedings, 22:1167–1174, 2020.
- [8] SARKAR, A.; KROP, E. M.. **Marrying oral tribology to sensory perception: A systematic review**. Current Opinion in Food Science, 27:64–73, 2019.
- [9] YARIM, G.; UCHYTIL, R.; MAY, R.; TREJO, A. ; CHURCH, P.. **Stuck pipe prevention—a proactive solution to an old problem**. In: SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION?, p. SPE–109914. SPE, 2007.
- [10] CHERAGHIAN, G.. **Nanoparticles in drilling fluid: A review of the state-of-the-art**. Journal of materials research and technology, 13:737–753, 2021.
- [11] TA INSTRUMENTS. **Getting Started Guide: Discovery Hybrid Rheometer (DHR Series)**. TA Instruments – Waters LLC, New Castle, DE, revision b edition, 2013. Issued April 2013.

- [12] PÉREZ-MARTÍNEZ, P.; GALVAN-MIYOSHI, J. ; ORTIZ-LÓPEZ, J.. **Ultrasonic cavitation effects on the structure of graphene oxide in aqueous suspension**. *Journal of Materials Science*, 51(24):10782–10792, 2016.
- [13] MALISKA, A. M.. **Microscopia eletrônica de varredura**. Florianópolis: Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens. Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [14] ZHU, Y.; BHANDARI, B. ; PRAKASH, S.. **Tribo-rheometry behaviour and gel strength of κ -carrageenan and gelatin solutions at concentrations, ph and ionic conditions used in dairy products**. *Food Hydrocolloids*, 84:292–302, 2018.
- [15] SAMYN, P.; BAETS, P. D.. **Friction and wear of acetal: A matter of scale**. *Wear*, 259(1):697–702, 2005. 15th International Conference on Wear of Materials.
- [16] INSTRUMENTS, T.. **An introduction to tribo-rheometry: Quantifying friction**. <https://www.youtube.com/watch?v=lobBbcfC8A4>, January 2016.
- [17] FENG, K.; LI, W.; MA, K.; YU, L.; ZOU, W. ; LONG, G.. **Effect of pre-shearing regimes on rheological parameters of cement paste**. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(4):2093–2109, 2024.
- [18] PRADAL, C.; STOKES, J. R.. **Oral tribology: Bridging the gap between physical measurements and sensory experience**. *Current Opinion in Food Science*, 9:34–41, 2016.
- [19] WNEC, G.. **Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering**. Dekker, 2004.
- [20] MUTHOOSAMY, K.; MANICKAM, S.. **State of the art and recent advances in the ultrasound-assisted synthesis, exfoliation and functionalization of graphene derivatives**. *Ultrasonics sonochemistry*, 39:478–493, 2017.
- [21] MENG, Y.; XU, J.; JIN, Z.; PRAKASH, B. ; HU, Y.. **A review of recent advances in tribology**. *Friction*, 8:221–300, 2020.
- [22] LAEUGER, J.. **Advanced rheological and tribological methods for cosmetic products**. 2018.
- [23] HAMROCK, B. J.; SCHMID, S. R. ; JACOBSON, B. O.. **Fundamentals of fluid film lubrication**. CRC press, 2004.

- [24] JOYNER, H. S.; PERNELL, C. W. ; DAUBERT, C. R.. **Impact of formulation and saliva on acid milk gel friction behavior**. Journal of food science, 79(5):E867–E880, 2014.
- [25] RAPOPORT, L.; LESHCHINSKY, V.; LAPSKER, I.; VOLOVIK, Y.; NEPOMNYASHCHY, O.; LVOVSKY, M.; POPOVITZ-BIRO, R.; FELDMAN, Y. ; TENNE, R.. **Tribological properties of ws2 nanoparticles under mixed lubrication**. wear, 255(7-12):785–793, 2003.
- [26] NGUYEN, P. T.; BHANDARI, B. ; PRAKASH, S.. **Tribological method to measure lubricating properties of dairy products**. Journal of Food Engineering, 168:27–34, 2016.
- [27] GODOI, F. C.; BHANDARI, B. R. ; PRAKASH, S.. **Tribo-rheology and sensory analysis of a dairy semi-solid**. Food Hydrocolloids, 70:240–250, 2017.
- [28] KAVEHPOUR, H.; MCKINLEY, G.. **Tribo-rheometry: from gap-dependent rheology to tribology**. Tribology Letters, 17:327–335, 2004.
- [29] COMMITTEE, A. S. S. A. S. S.; OTHERS. **Drilling fluids processing handbook**. Elsevier, 2011.
- [30] NACCACHE, M. F.. **Análise e aperfeiçoamento de viscosímetro rotacional de campo através da reologia de fluidos de perfuração**. PhD thesis, PUC-Rio, 2021.
- [31] SARKAR, A.; ANDABLO-REYES, E.; BRYANT, M.; DOWSON, D. ; NEVILLE, A.. **Lubrication of soft oral surfaces**. Current Opinion in Colloid & Interface Science, 39:61–75, 2019.
- [32] DANIEL FOX, KIERAN M. LYNCH, A. W. S.; ARENDT, E. K.. **Soft tribology using rheometers: A practical guide and introduction**. Journal of the American Society of Brewing Chemists, 79(3):213–230, 2021.