

MARCUS VINÍCIUS VIEIRA MACEDO

**DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE ÓLEO
LUBRIFICANTE HIDROSSOLÚVEL**

Relatório do Projeto de Formatura da Disciplina
PMC-581 – Projeto Mecânico II

São Paulo
2002

13 de 03/02

5,0

Godan

aguarda

nota Prof
Amilcar

MARCUS VINÍCIUS VIEIRA MACEDO

**DESEMPENHO TRIBOLÓGICO DE ÓLEO
LUBRIFICANTE HIDROSSOLÚVEL**

Relatório do Projeto da Disciplina PMC-581 –
Projeto Mecânico II , da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo.

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:
Prof. Doutor
Amilton Sinatora

São Paulo
2002

AGRADECIMENTOS

Muitas pessoas auxiliaram no desenvolvimento deste projeto. Gostaria, portanto, de agradecer a todo o pessoal que trabalha no Laboratório de Fenômenos de Superfície na Escola Politécnica da USP, pelas sugestões, . Agradeço também à Prof. Lídia Rubacow Iotti, coordenadora do Laboratório de Ensaios em Óleos Lubrificantes e Combustíveis da Escola SENAI “Conde José Vicente de Azevedo” por gentilmente ter realizado a espectrometria dos óleos ensaiados. Gostaria também de agradecer ao Prof Dr. Bronislaw Polakiewicz do Faculdade de Ciências Farmacêuticas da USP pelo indispensável e útil auxílio na sintetização do óleo lubrificante que foi escopo deste projeto.

Agradeço ao Sr. Eng. Duccio Cataldo Colaioni pela indispensável ajuda durante todo trabalho, participando ativamente do projeto, dando o privilégio para um simples aluno, de trabalhar um pouco com alguém com tanto conhecimento.

Agradeço a Dra. Márcia Marie Maru, que desde o início me acompanhou na realização das atividades. Sempre atenciosa, ela foi extremamente útil discutindo, sugerindo, corrigindo e motivando sempre, o que tornou o trabalho bastante prazeroso .

E finalmente, agradeço ao querido Prof. Doutor Amilton Sinatora, excelente orientador e professor. Sempre presente e disposto, me motivou, me esclareceu e me orientou em todas as fases do trabalho. Sem dúvida, o grande responsável pelo projeto ter sido realizado. Muito Obrigado.

RESUMO

O relatório a seguir apresenta uma visão geral do projeto que começou a ser desenvolvido na Disciplina PMC-580 e será desenvolvido na disciplina PMC-581, incluindo os resultados parciais obtidos até o presente momento. Tal projeto consiste na avaliação do desempenho tribológico de um óleo lubrificante hidrossolúvel desenvolvido pelo autor em trabalho realizado na disciplina PMC0411 –Introdução à Tribologia. Para tal avaliação serão realizados ensaios tribológicos utilizando equipamentos do tipo Pino – contra – Placa (Plint TE67), e então análises, tais como, espectrometria de massa, microscopia dos corpos de prova, análises físico-químicas para a caracterização dos óleos lubrificantes usados e dos corpos de prova além das análises dos resultados obtidos pelos softwares dos equipamentos utilizados. O óleo lubrificante, cujo desempenho será avaliado, será comparado com óleos lubrificantes já estabelecidos no mercado (Vítrea – Shell) e com variações do mesmo (diluído em 20% de água).

ABSTRACT

The following report presents the project that was started during the subject PMC-580 and that was developed during the subject PMC-581, it also includes the results obtained from the analysis that have been done. This project consists of a tribological behavior evaluation of an hydro-soluble lubricating oil developed by the author during the subject PMC0411 – Introduction to Tribology. For such evaluation it will be performed some tribological assays using equipment pin-on-plate (Plint TE67), and then some analysis, like mass spectrometry, optical microscopia of the plate and the pin, physical-chemical assays for characterization of the lubricating oils and of the plate and pin used. Finally the results obtained from the utilized equipments' softwares will be analyzed. The lubricating oil, whose behavior will be evaluated, will be compared to lubricating oil well established in the market (Vítrea – Shell) and to a variation of itself (20% dilution with water).

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| <u>AGRADECIMENTOS</u> | 3 |
| <u>RESUMO</u> | 4 |
| <u>ABSTRACT</u> | 5 |
| <u>SUMÁRIO</u> | 6 |
| <i>Tribologia</i> | 13 |
| <i>Lubrificação</i> | 14 |
| <u>MATERIAIS E MÉTODOS</u> | 21 |
| <i>Materiais</i> | 21 |
| <i>Métodos</i> | 23 |
| <u>RESULTADOS</u> | 27 |
| - <i>Resultados do Equipamento de Ensaio TE67</i> | 27 |
| - <i>Resultados da Análise de Perda de Massa</i> | 38 |
| - <i>Resultados da Espectrometria</i> | 40 |
| - <i>Resultados da Microscopia</i> | 42 |
| - <i>Resultados da análise de Perfil de Rugosidade</i> | 49 |
| <u>DISCUSSÃO</u> | 52 |
| <u>RESUMO DAS CONCLUSÕES</u> | 54 |
| <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> | 56 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | – Tipos de Lubrificação Hidrodinâmica | 15 |
| Figura 2 | – Diferenças entre Lubrificação Hidrodinâmica e EHL | 16 |
| Figura 3 | – Regimes de Lubrificação de um joelho humano..... | 17 |
| Figura 4 | – Fórmula do Ácido Hialurônico..... | 18 |
| Figura 5 | – Equipamento Plint&Partners TE67..... | 23 |
| Figura 6 | – Dispositivos utilizados no equipamento TE67..... | 25 |
| Figura 7 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo X3..... | 28 |
| Figura 8 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo X3..... | 28 |
| Figura 9 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo X3..... | 28 |
| Figura 10 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo X2..... | 29 |
| Figura 11 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo X2..... | 29 |
| Figura 12 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo X2..... | 29 |
| Figura 13 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo X1..... | 30 |
| Figura 14 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo X1..... | 30 |
| Figura 15 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo X1..... | 30 |
| Figura 16 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo Vítrea2..... | 31 |
| Figura 17 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo Vítrea2..... | 31 |
| Figura 18 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo Vítrea2..... | 31 |
| Figura 19 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo Vítrea3..... | 32 |
| Figura 20 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo Vítrea3..... | 32 |
| Figura 21 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo Vítrea3..... | 32 |
| Figura 22 | – Gráfico de Força de Atrito e Desgaste do óleo V..... | 33 |
| Figura 23 | – Gráfico de Coeficiente de Atrito do óleo V..... | 33 |
| Figura 24 | – Gráfico de Potencial de Contato do óleo V..... | 33 |
| Figura 25 | – Placa – Óleo X1..... | 34 |
| Figura 26 | – Placa – Óleo X2..... | 34 |
| Figura 27 | – Placa – Óleo X2..... | 34 |
| Figura 28 | – Placa – Óleo V1..... | 34 |

| | |
|---|----|
| Figura 29 – Placa – Óleo V1..... | 34 |
| Figura 30 – Placa – Óleo VIT1..... | 34 |
| Figura 31 – Placa – Óleo VIT2..... | 34 |
| Figura 32 – Placa – Óleo VIT3..... | 34 |
| Figura 33 – Comparativo de Coeficiente de Atrito (X e Vítrea)..... | 35 |
| Figura 34 – Comparativo de Coeficiente de Atrito (X ,Vítrea)..... | 35 |
| Figura 35 – Comparativo de Coeficiente de Atrito (X ,Vítrea, V)..... | 36 |
| Figura 36 – Coeficiente de Atrito X..... | 37 |
| Figura 37 – Coeficiente de Atrito de Junta Sinuial de Rato..... | 37 |
| Figura 38 – Comparativo de Perda de Massa (X e Vítrea)..... | 38 |
| Figura 39 – Comparativo de Perda de Massa (X ,Vítrea, V)..... | 39 |
| Figura 40 – Comparativo de Quantidade de Fe no óleo (X ,Vítrea, V).... | 40 |
| Figura 41 – Comparativo de Quantidade de Fe no óleo (X ,Vítrea, V)..... | 41 |
| Figura 42 – Fotos da pista de desgaste (50x) | 42 |
| Figura 43 – Foto da Borda Inferior (X e Vítrea , 50x)..... | 43 |
| Figura 44 – Foto da Borda Inferior (X e Vítrea , 200x)..... | 43 |
| Figura 45 – Foto Borda esquerda. Óleo V. Aum. 50x | 44 |
| Figura 46 – Foto Borda esquerda. Óleo V. Aum. 100x..... | 44 |
| Figura 47 – Foto Meio da Pista. Óleo V. Aum. 50x..... | 44 |
| Figura 48 – Foto Meio da Pista. Óleo V. Aum. 100x..... | 44 |
| Figura 49 – Foto Meio da Pista. Óleo X. Aum. 100x..... | 44 |
| Figura 50 – Foto Meio da Pista. Óleo Vítrea. Aum. 100x..... | 44 |
| Figura 51 – Foto Borda esquerda (X e Vítrea) aumento 100x..... | 45 |
| Figura 52 – Foto Meio da Pista (X e Vítrea) aumento 100x..... | 45 |
| Figura 53 – Foto Borda esquerda e Pino (Vítrea) aumento 50x..... | 46 |
| Figura 54 – Foto Borda esquerda e Pino (X) aumento 50x..... | 46 |
| Figura 55 – Foto Borda esquerda e Pino (X) aumento 100x..... | 47 |
| Figura 56 – Foto Borda esquerda e Pino (Vítrea) aumento 100x..... | 47 |
| Figura 57 – Foto Meio da Pista e Pino (V) aumento 50x..... | 48 |

| | |
|--|----|
| Figura 58 – Foto Meio da Pista e Pino (V) aumento 100x..... | 48 |
| Figura 59 – Perfis de Rugosidade placas ensaiadas com Vítrea..... | 49 |
| Figura 60 – Ampliação do Vale do Perfil de Rugosidade do Vítrea..... | 50 |
| Figura 61 – Perfis de Rugosidade placas ensaiadas com X..... | 50 |
| Figura 62 – Ampliação do Vale do Perfil de Rugosidade do X..... | 51 |
| Figura 63 – Comparativo de Perfis de Rugosidade (X e Vítrea)..... | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | | | |
|----------|---|---------------------------------------|----|
| Tabela I | – | Tabela de Coeficientes de Atrito..... | 18 |
|----------|---|---------------------------------------|----|

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------|-----------------------------|----|
| EHL | – Elastohidrodinâmico | 14 |
| Aum. | – Aumento..... | 44 |
| 50x | – Aumento de 50 vezes..... | 42 |
| 100x | – Aumento de 100 vezes..... | 43 |
| 200x | – Aumento de 200x | 44 |
| Coef. | - Coeficiente..... | 35 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | | |
|-------|-------------------------------|----|
| μ | – Coeficiente de Atrito | 18 |
| N | – Newton..... | 23 |
| °C | – Graus Celsius..... | 19 |
| V | – Velocidade..... | 24 |
| Π | – número 3,14..... | 24 |
| C | – Carbono..... | 18 |
| O | – Oxigênio..... | 18 |
| H | – Hidrogênio..... | 18 |
| N | – Nitrogênio..... | 18 |
| a | – Avanço | 24 |
| f | – frequência | 24 |

INTRODUÇÃO

Tribologia

Quando se fala em desempenho tribológico de óleo lubrificante hidrossolúvel várias considerações se fazem necessárias pois é um título que contém muita informação.

Para começar, o que é Tribologia? Quais as implicações em aplicar tribologia?

O termo tribologia provem da palavra grega “tribos” que significa fricção, atrito, então Tribologia significa literalmente a ciência do Atrito.[3] No dicionário Tribologia é definida como a ciência e tecnologia da interação entre superfícies em movimento relativo e de assuntos e práticas relacionadas.[3] Podemos perceber por esta definição que se trata de uma área com um amplo campo de atuação e de interesse dos mais diversos especialistas como Químicas, engenheiros mecânicos, metalurgistas, físicos , interessando inclusive a médicos. O interesse em diminuir ou mesmo aumentar o atrito e/ou desgaste nas superfícies é antigo. A primeira aplicação prática de atrito foi o ato de fricção para conseguir calor para acender fogueiras nos tempos da pré-história. A segunda aplicação foi a utilização da roda, roletes, troncos ou outros meios para facilitar a translação de objetos pesados em épocas que datam mais de 7000 anos atrás .[4]

Porém o estudo científico da tribologia, e de suas implicações para o controle do atrito e do desgaste entre as partes é recente, os primeiros estudiosos do atrito incluem Amontons (1699), Coulomb (1785), e Morin(1833).[3]

Um sistema tribológico é composto de três partes principais: O corpo em movimento, o contra-corpo e o meio interfacial. Ao lidar com a interação de duas superfícies sólidas em movimento num dado ambiente dois fatos devem ser observados:

- Há dissipação de energia que é a resistência ao movimento e é indicado pelo coeficiente de atrito. Esta dissipação resulta em calor no contado, e algum barulho. Deve-se observar que parâmetros como coeficiente de

atrito se relaciona ao par que está em contato e não apenas à uma das duas superfícies.

- Durante o processo de deslizamento as superfícies estão sujeitas a grandes ou pequenas modificações em suas características básicas, como rugosidade, desgaste e outras.

Outros aspectos interessantes da importância da tribologia é o econômico. Uma atenção corretamente dispensada para o uso da tribologia em aplicações industriais poderiam economizar, anualmente, de 1,3% a 1,6% do PNB dos Estados Unidos da América, um valor que ultrapassa os 100 bilhões de dólares.[8]

Pode-se então pensar: Qual seria a melhor solução (o melhor desempenho tribológico) para transportar uma carga através de uma superfície com atrito e desgaste aceitáveis? Existem diversas maneiras e uma delas consiste na lubrificação das superfícies em contato.

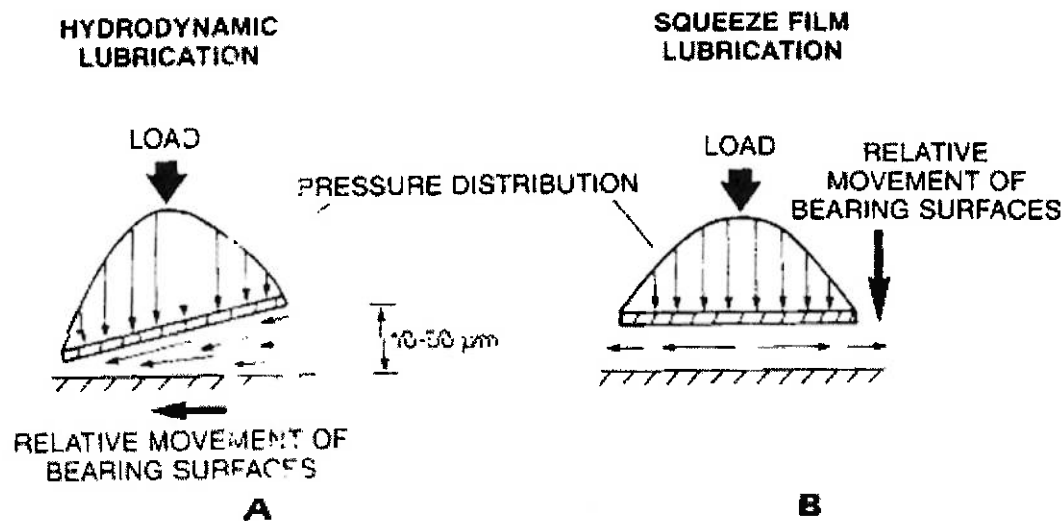
Lubrificação

Lubrificação é o uso de um meio (lubrificante) entre as superfícies em contato de forma a reduzir as forças de atrito no contato. O lubrificante funciona introduzindo uma camada de material com uma força de cisalhamento menor entre as superfícies, em alguns sistemas lubrificados, o lubrificante pode não evitar totalmente o contato das asperezas das superfícies, mas com certeza o diminuirá. Em outros casos o lubrificante pode separar totalmente as superfícies e nenhum contato ocorre.[1]

Muitos materiais podem ser usados como lubrificantes e existem também vários tipos de regimes de lubrificação. Os regimes de lubrificação são divididos basicamente em três:

- Lubrificação Hidrodinâmica
- Lubrificação ElastoHidroDinâmica (EHL)
- Lubrificação de Limite

Na lubrificação hidrodinâmica as superfícies são separadas por um filme de fluido lubrificante, que normalmente é maior que a altura das asperezas das superfícies em contato. A pressão hidrostática no filme causa apenas pequenas distorções elásticas nas superfícies, que a princípio podem se tratadas como sendo



rígidas.

Figura 1: Mostra os tipos de lubrificação hidrodinâmica [10]

A lubrificação do tipo squeeze film acontece quando as superfícies estão se movendo perpendicularmente entre si. A viscosidade do fluido no espaço entre as superfícies produz uma pressão que tende a forçar o fluido lubrificante para fora. Este mecanismo é capaz de suportar altas cargas por curtos períodos de tempo. Assim que o fluido é forçado para fora a espessura do filme lubrificante diminui e as superfícies entram em contato.

Na lubrificação EHL as pressões locais são tão altas e o filme lubrificante tão fino que as deformações elásticas não podem mais ser desprezadas, na verdade elas são um ponto crucial deste tipo de lubrificação.

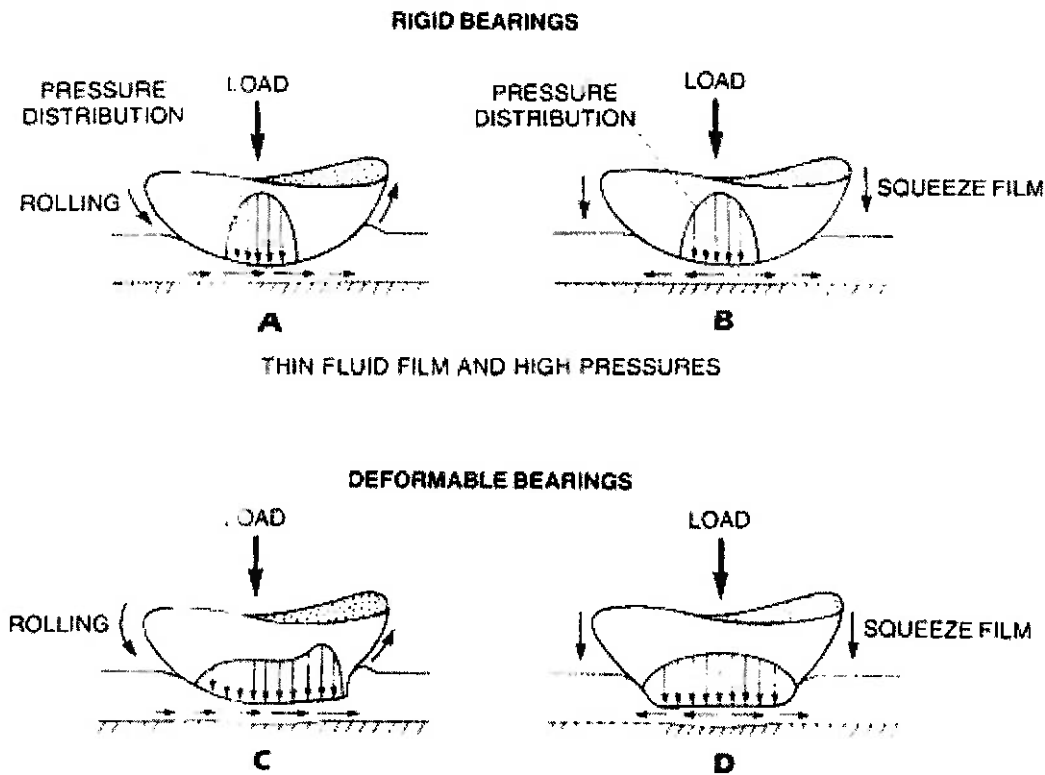


Figura 2: Representa esquematicamente as diferenças entre considerar as superfícies rígidas (Lubrificação Hidrodinâmica) e a Lubrificação EHL, com superfícies deformáveis[10].

Na Lubrificação limite ou limítrofe, as superfícies são separadas por um filme molecular adsorvido, normalmente de um óleo ou fluido lubrificante para este fim[1]. Em geral este tipo de lubrificação acontece sobre altas pressões ou a velocidades muito baixas. As forças de repulsão dos filmes adsorvidos carregam boa parte da carga reduzindo o contato direto entre as asperezas.

Na atividade industrial os mancais lubrificados são componentes de vital importância. Não há indústria que não utilize pelo menos um destes componentes, e pode-se ir além, pois mesmo fora da indústria eles são imprescindíveis, como por exemplo no corpo humano temos as juntas sinoviais.

As juntas sinoviais são mancais excepcionais. Nos seres humanos, normalmente operam como mancais dinamicamente carregados, sujeitos a cerca de 10^{18} ciclos de carga por uma vida de 70 anos [8]. Elas devem suportar o movimento oscilatório associado aos requisitos da locomoção humana e suas posições na

estrutura do esqueleto, e que como mostrado na figura abaixo, trabalha em quase todos os regimes de lubrificação possíveis.

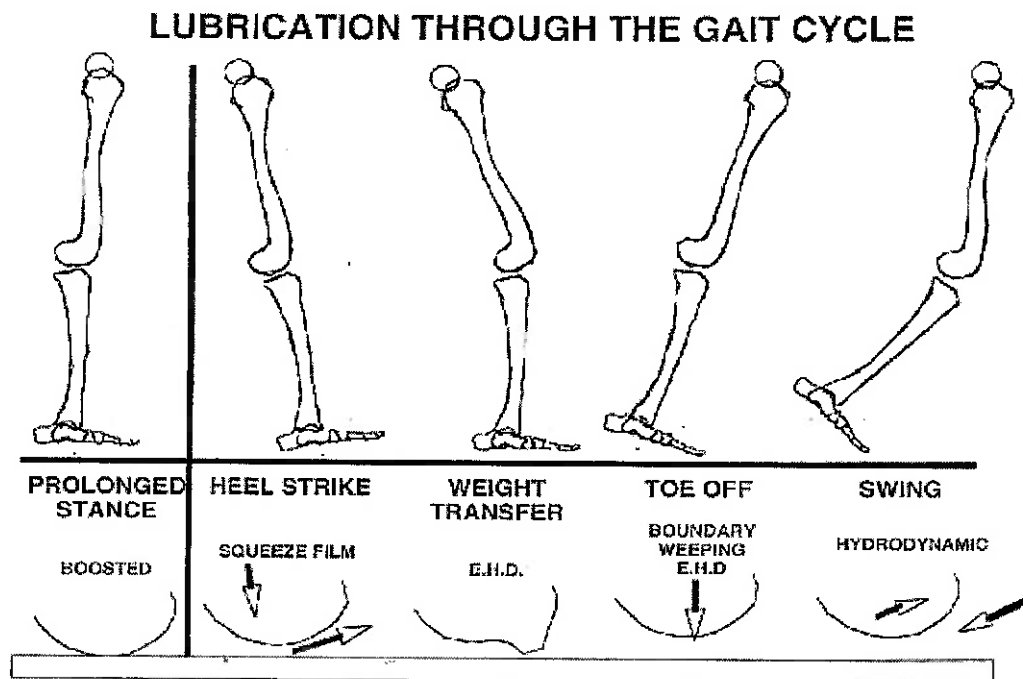


Figura 3: Mostra os regimes de lubrificação à que um joelho humano se submete quando realiza um simples passo[10].

As juntas sinoviais naturais apresentam características de muitos mancais encontrados na engenharia. Consistem de uma camada de cartilagem articular, a qual pode ser considerada como material que compõe o mancal, sobre um substrato relativamente duro, os ossos. O lubrificante (líquido sinovial) é um fluido à base de água, que tem como espessante o ácido hialurônico e proteínas como a glucosamina.

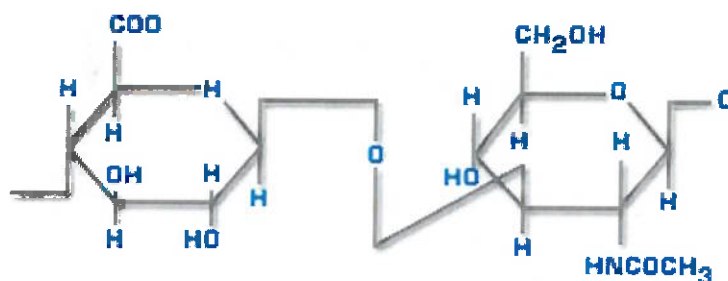


Figura 4: Estrutura do Ácido Hialurônico

O ácido não só gera um fluido viscoso que assegura uma lubrificação adequada nas mais variadas condições em juntas saudáveis e combina-se com proteínas para formar um ótimo lubrificante limite, como também apresenta a capacidade de absorver choques (em pequena escala). Na verdade, não só o líquido sinovial, mas também a própria cartilagem tem o ácido hialurônico em sua composição, onde se combina com outras moléculas, o que auxilia a suportar as forças aplicadas e o movimento relativo entre os ossos.

Em termos tribológicos tem-se, para grandes juntas sinoviais do corpo humano, como joelho ou bacia, coeficientes de fricção médios baixos se comparado a par de materiais conhecidos.

| Superfícies | Coeficiente de Fricção | |
|-----------------------------------|------------------------|----------------|
| | μ estático | μ Dinâmico |
| Borracha ed Pneu em Concreto Seco | 1,0 | 0,7 |
| Alumínio em Alumínio | 0,8 | 0,5 |
| Aço em Gelo | | 0,03 |
| Teflon em Teflon | | 0,05 |
| Esferas de rolamento | | 0,1-0,001 |
| Grafite em grafite | | 0,1 |
| Materiais de Implantes Protéticos | | 0,05 |
| Juntas Sinoviais Humanas | | 0,001 |

Tabela 1: Coeficiente de atrito para juntas humana é relativamente baixo[10]

Pelo mostrado, percebe-se que as propriedades das juntas sinoviais são muito boas se comparadas às propriedades encontradas em lubrificantes de mancais industriais convencionais. Isto leva à consideração de a resposta da pergunta feita anteriormente sobre como diminuir o atrito e o desgaste pode ser usar os materiais

humanos em aplicações de engenharia, porém o líquido, contendo proteínas, não mantém suas características acima de 40°C, temperatura facilmente atingida na indústria[9]. Outro problema viria do fato de que a retirada em larga escala de líquido sinovial seria inviável economicamente, uma vez que a quantidade obtida não seria suficiente para suprir a demanda do mercado.

Após a rejeição do uso do líquido sinovial como lubrificante, passou-se a estudar uma analogia entre o líquido e um produto que pudesse ser utilizado como lubrificante industrial, com as mesmas características do ácido hialurônico. Para isso pesquisou-se substâncias que pudessem formar uma molécula semelhante à deste ácido.

Um monômero do ácido hialurônico possui oxidrilas, carboxilas e grupos amínicos, e cada monômero tem 12 carbonos principais. Seguindo esta “receita” procurou-se uma estrutura semelhante. No mercado existe um lubrificante a base d’água aditivado, cujo espessante é o produto da reação entre um poliglicol, óxido de propileno e óxido de etileno. Porém, além do espessante possuir peso molecular baixo (4000), não possui nitrogênio e não tem as propriedades necessárias procuradas.

Partindo disso, pensou-se em uma fórmula que pudesse alcançar o peso molecular próximo ao do ácido hialurônico e que esse aumento de peso pudesse ser controlado; teria também de possuir nitrogênio, e ser solúvel em água além é claro de ser semelhante à fórmula do ácido hialurônico.

Sabe-se que numa reação de esterificação ácido é adicionado a um álcool na produção de éster e água. O éster pode então ser polimerizado para se atingir o peso molecular requerido. A partir destes conhecimentos, e do conhecimento de ácidos e álcoois difundidos na indústria, obteve-se uma molécula cuja constituição foi inspirada na do ácido hialurônico. Não sendo este produto cíclico, como o desejado e também não possui nitrogênio na cadeia, o pode ser remediado com uma reação de cloração seguida de uma amonólise (esta é facilmente controlável e permite a adição da quantidade desejada de nitrogênio). Este óleo foi sintetizado e o objetivo deste

trabalho é avaliar o desempenho tribológico deste novo óleo lubrificante hidrossolúvel.

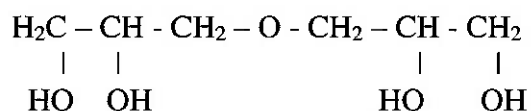
MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

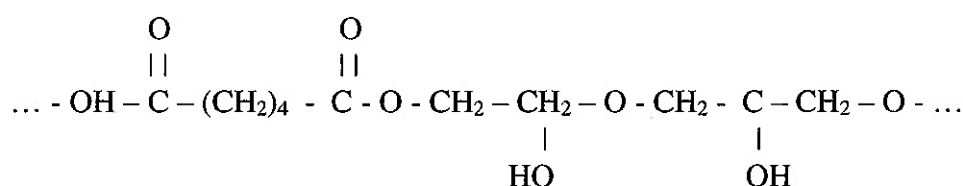
O óleo foi sintetizado no Laboratório de Farmácia Industrial da Faculdade de Ciências Farmacêuticas na Universidade de São Paulo, com a Supervisão do Prof Dr. Bronislaw Polakiewicz, responsável pelo laboratório. O ácido utilizado foi o Ácido Adípico, um ácido bifuncional, para permitir a polimerização. Este ácido possui 6 carbonos e tem a seguinte fórmula:



E o álcool utilizado foi um diglicerol, de fórmula:



O que resultou (teoricamente) em:



Que é a fórmula do espessante procurado.

Para a sintetização do expessante, foram utilizados seguintes insumos:

- Ácido Adípico
- Diglicerol
- Água

O equipamento utilizado para a reação foi um reator de 1000 ml, com manta elétrica, balão com duas bocas, termômetro, condensador, béquer para a retirada de água. Para as medições de peso utilizou-se uma balança digital.

Os reagentes foram misturados e aquecidos no reator; por uma das bocas do condensador ligava-se o condensador e na outra o termômetro para controlar a temperatura da reação que ficou em torno de 160°C.

Pela saída de água pelo condensador foi possível prever o quanto já havia polimerizado pela massa de água retirada e foi isso que determinou o fim da reação. Foram retirados aproximadamente 50 g de água.

O material utilizado para os pinos foi o Aço inoxidável 52100. Os pinos foram usinados e retificados a uma dimensão final de 3mm de diâmetro por 23mm de comprimento. As bordas dos pinos foram usinadas com um raio de arredondamento de 0,2mm.

O material das placas foi o ferro fundido cinzento. As placas foram retiradas de discos fundidos em molde de areia e tiveram acabamento retificado, perpendicular à direção do ensaio, com dimensão final de 38mm x 58 mm x 5 mm.

Como lubrificantes foram utilizados:

O óleo produzido (espessante) com a finalidade de “imitar” as características do Ácido Hialurônico, chamado de Óleo X. Foi também utilizado uma variação deste óleo, consistindo no óleo X com 20% de água em volume, denominado no trabalho de Óleo V e, por fim, foi utilizado um óleo lubrificante multiviscoso para motores a diesel, composto de óleo mineral derivado de petróleo, classe 15W40, atendendo aos requisitos da especificação API CF, chamado de Vítrea.

Para limpeza dos materiais foi utilizado álcool 99°. GL e equipamento de ultrassom. Para a secagem foi utilizado ventilador de ar quente.

Métodos

Para a realização dos ensaios foi utilizada a uma máquina de modelo TE67 da PLINT & PARTNERS, montada para ensaios do tipo pino-contra-placa de movimento alternado.



Figura 5: A primeira figura mostra o equipamento PLINT & PARTNERS e a segunda o computador e a controladora (Abaixo do monitor).

Este equipamento permite o controle e monitoramento de carga normal, velocidade de rotação (frequência), temperatura da placa, força de atrito média, potencial de contato elétrico e tempo de ensaio. Esses valores são impressos eletronicamente em um arquivo do tipo .OUT e que pode ser lido através de MS-Excel para tratamento. Os dados podem ser gravados a cada um até a cada dez segundos de ensaio, por meio de um computador ligado à controladora e à placa de aquisição de dados.

O equipamento permite diversas configurações de parâmetros de teste como os explicados a seguir:

Os valores máximos permitidos para carga normal são 100 N, com sistema de peso morto, ou 1000 N, utilizando-se de um atuador pneumático. A temperatura do aquecedor sobre o suporte da placa a ser testada atinge um valor máxima de 400°C.

medida pela aresta da placa por um termo par do tipo K e denominada nos testes como T1. Essas temperaturas são medidas durante o ensaio. A frequência de oscilação máxima que pode ser utilizada é de 5Hz para um curso máximo de 50 mm. A velocidade máxima se relaciona com a frequência conforme a equação abaixo:

$$V = \pi \cdot f \cdot a$$

onde:

V: Velocidade máxima linear da placa [mm/s]

f : frequência de oscilação [Hz]

a = curso do pino sobre a placa [mm]

A força de atrito é adquirida por um circuito eletrônico r.m.s. no sistema de aquisição de dados, que determina o armazenamento de valores médios quadráticos.

O potencial de contato elétrico mede a diferença de potencial entre pino e placa. Quanto maior o valor maior isolamento existe, ou seja, para valores próximos de 45 mV, o isolamento é total, e para valores próximos de zero há contato metálico entre pino e placa. Esta medida é uma maneira de tentar representar a espessura de filme lubrificante entre as amostras.

Os ensaios realizados utilizaram os seguintes parâmetros de teste aplicados pela máquina:

Carga aplicada com utilização de atuador pneumático: 283 N

Frequência de Oscilação: 4,2 Hz

Temperatura: 100°. C

Percurso de oscilação: 16 mm por ciclo

A sala em que foi realizado o ensaio possuía controle de umidade relativa do ar e os testes foram realizados com uma taxa de umidade relativa do ar de aproximadamente 45% e temperatura de 26°.C.

Para montar o equipamento todas suas partes que entram em contato direto com o óleo foram lavadas com álcool 99°.GL e colocadas em equipamento de ultra

som por 15 minutos e secas por ar quente. Inclusive o pino e a placa. Este procedimento de limpeza foi realizado antes e depois de cada ensaio.



Figura 6: A primeira mostra o suporte da placa, a segunda o suporte para o pino e a terceira a placa a ser testada montada no suporte. As chapinhas laterais são para evitar o transbordamento de óleo.

Após o equipamento montado preenchia-se o suporte da placa com 10 ml do óleo a ser ensaiado, a partir de uma seringa de 3 ml para injeções intramusculares (sem agulha). Foi utilizada uma seringa para cada óleo.

O programa do equipamento realizava três passos para o início do teste:

O primeiro passo consistia de 10 segundos sem nenhum movimento. O segundo passo consistia de movimento sem carga na frequência programada para o aumento de temperatura, da temperatura ambiente para a temperatura programada em um intervalo de 1200 segundos. O terceiro passo consistia no ensaio propriamente dito porém a carga foi aumentada gradativamente até 283 N em um intervalo de tempo de 40 s aproximadamente. O ensaio consistia de 100000 ciclos com uma duração total de 12000s. (3 horas e 20 minutos sem contar os 20 minutos de aquecimento)

Foram realizados três ensaios com cada óleo: Óleo X, Óleo V, e Óleo Vítrea, lembrando que o óleo X é o óleo desenvolvido com o intuito de sintetizar algo com as características do ácido hialurônico, presente nas juntas sinoviais.

Foram feitas análises de Espectrometria nas amostras de óleo ensaiados e nas amostras de óleos novos, análises de rugosidade das placas, retirando o perfil de rugosidade da pista de desgaste, análise de perda de massa, pesando-se as placas e pinos antes e depois dos ensaios, foram feitas também fotos de microscopia, com

aumentos de 50x, 100x e 200x das placas ensaiadas e dos pino, além dos resultados obtidos pelo software do equipamento de ensaio de desgaste utilizado.

RESULTADOS

Os resultados serão apresentados por seções começando pelos resultados obtido pelo equipamento TE67.

- Resultados do Equipamento de Ensaio TE67

Os resultados preliminares obtidos a partir dos dados gravados pelo equipamento TE67 foram compilados em planilhas eletrônicas, e foram obtidos diversos gráficos porém serão explicitados somente os gráficos contendo os parâmetro mais importantes para desempenho tribológico : Coeficiente de Atrito, Força de Atrito, Degaste e Potencial de Contato. Todos foram feitos em relação à distância de deslizamento.

Todos os gráficos foram feitos utilizando as mesmas cores para os parâmetros, e as escalas dos eixos também são iguais na maioria dos gráficos, salvo nos gráficos em que os valores foram muito diferentes. Os desgaste (em azul escuro) deve ser lido no gráfico apenas com indicação qualitativa, pois o valor inicial não é zero e sim um valor atribuído pela máquina pela posição inicial do pino. Esse valor, logicamente aumenta, mais ou menos, dependendo do lubrificante, durante o teste. Para valores absolutos deve-se subtrair do valor final do gráfico o valor inicial. Este valor ficou em torno de 90 μm para os óleos X e Vítrea e 200 μm para o óleo V.

O Potencial de Contato é um dado que mede a diferença de potencial entre o pino e a placa, podendo ser usado para se ter uma idéia da espessura do filme de óleo. Quanto maior a diferença maior o filme de óleo formado. Um potencial zero indicaria que o pino está encostado na placa (curto-circuito).

Resultados dos testes realizados com o Óleo X

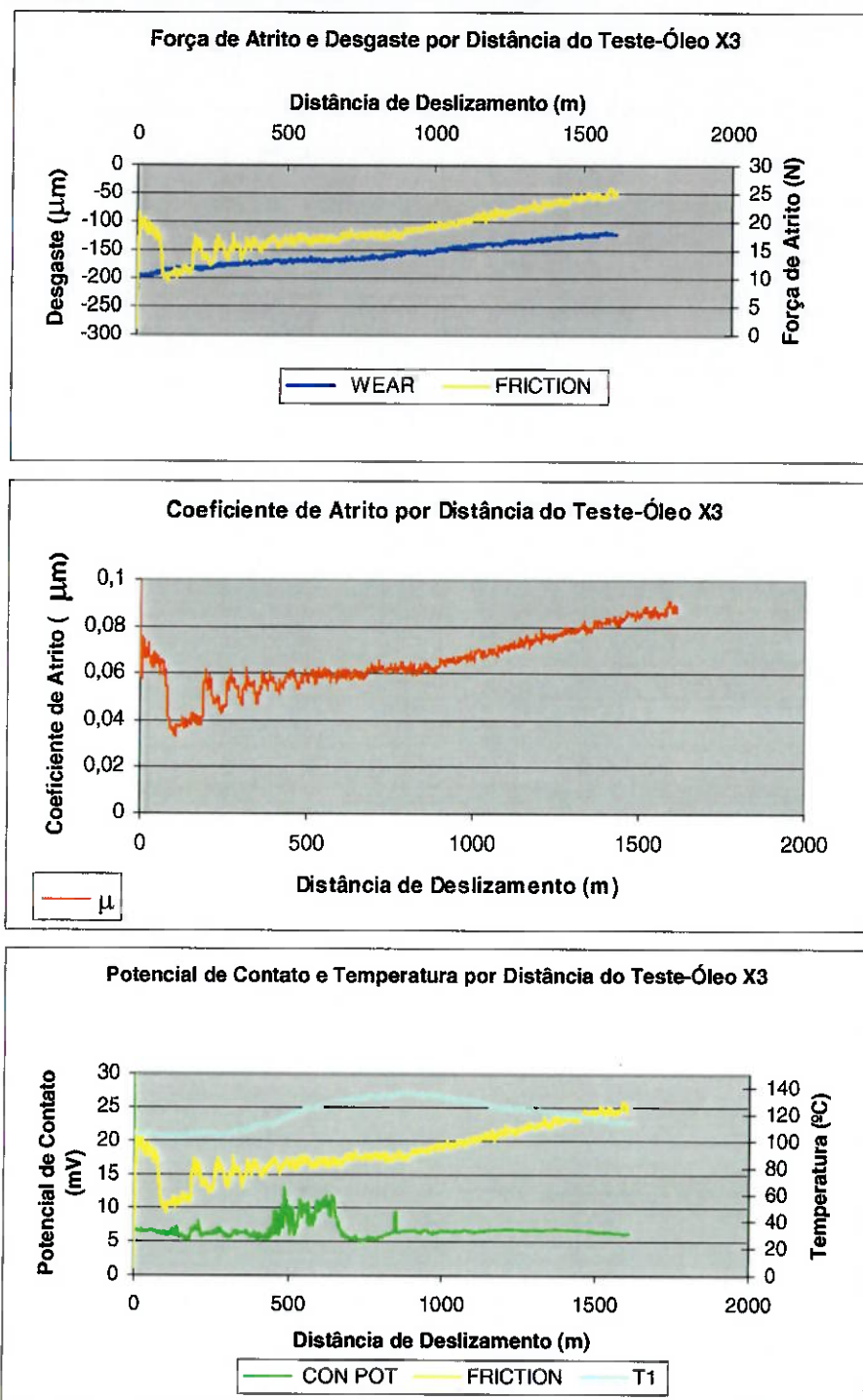


Figura 7: Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo X3. **Figura 8:** a segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo X3. **Figura 9:** A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância.

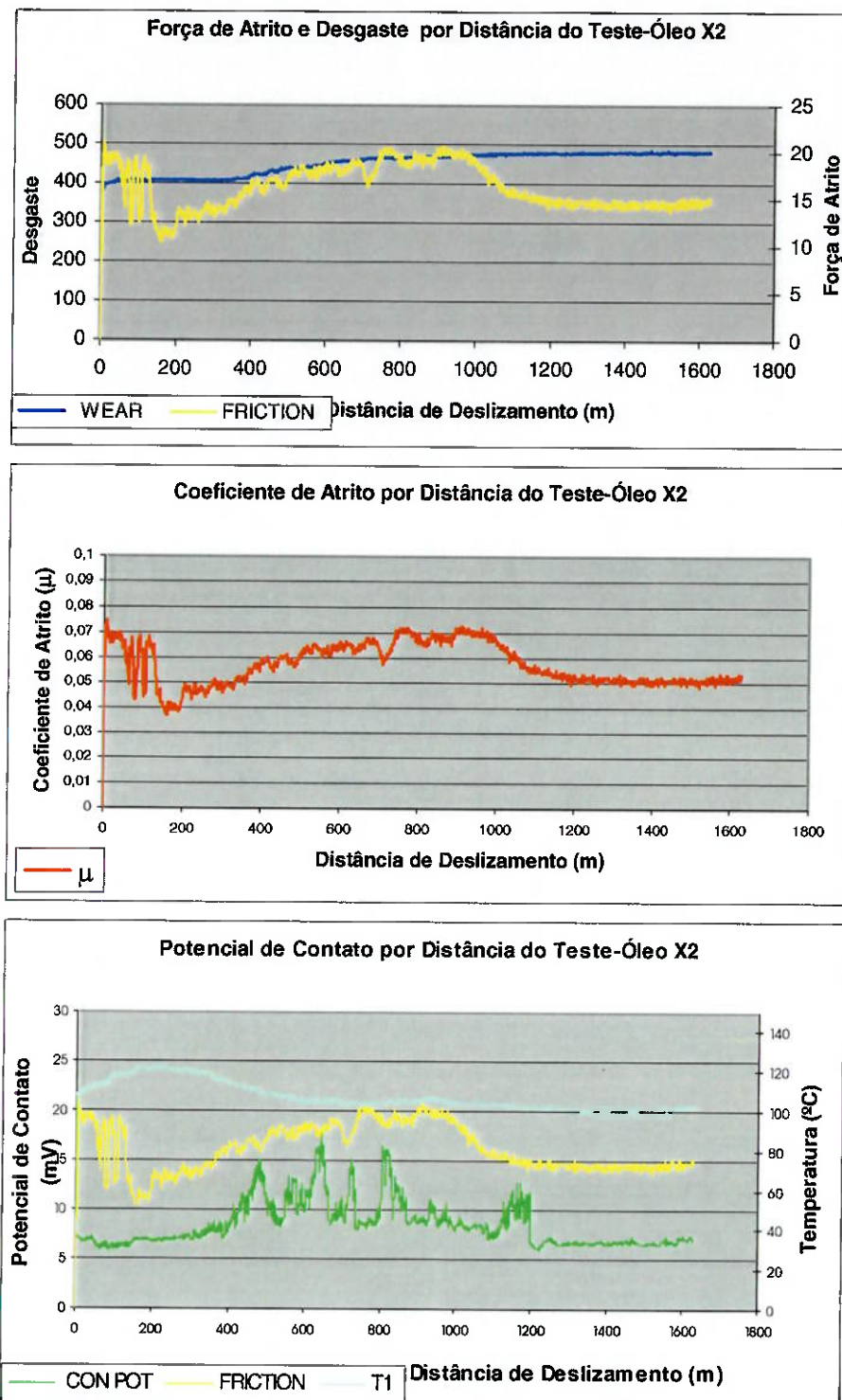


Figura 10:Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo X2. **Figura 11:**a segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo X2. **Figura 12:** A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância do Óleo X2.

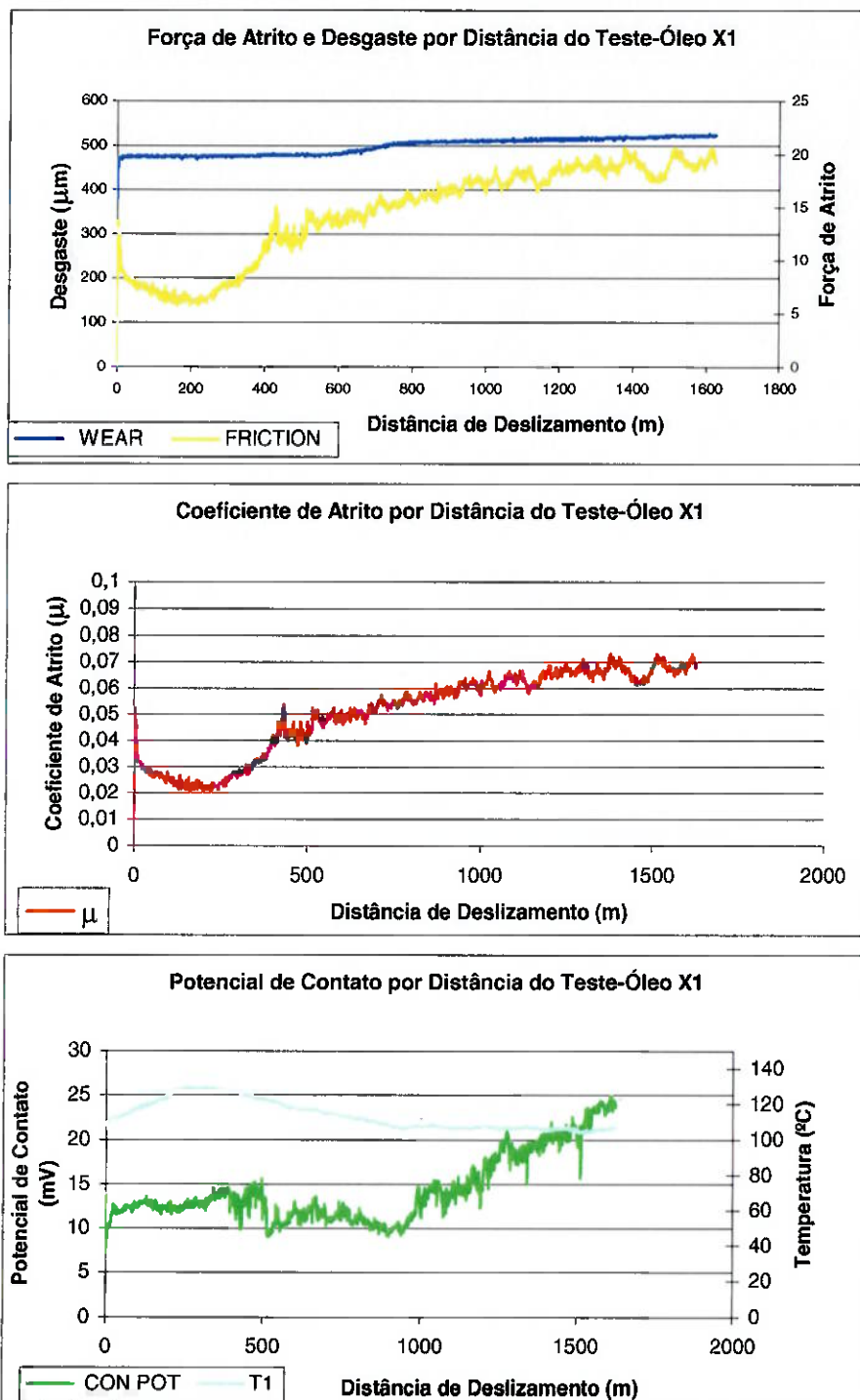


Figura 13:Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo X1. **Figura 14:**a segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo X1. **Figura 15:** A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância do Óleo X1.

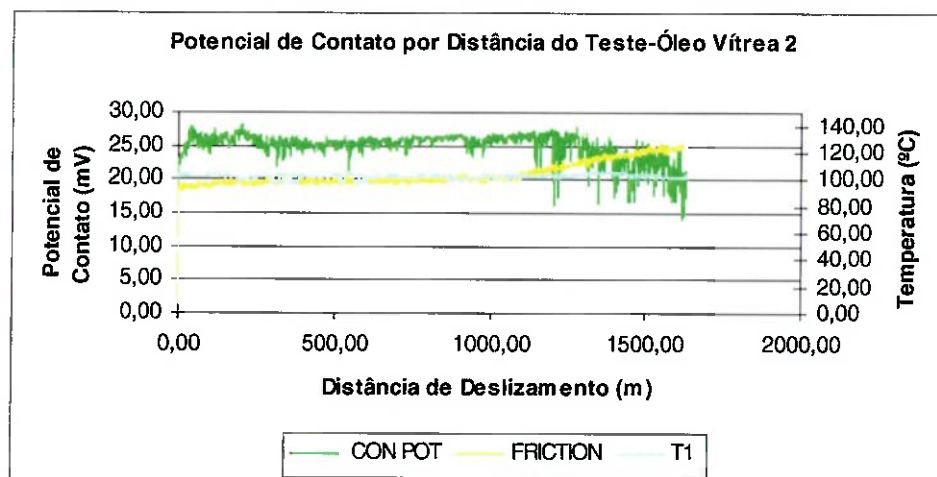
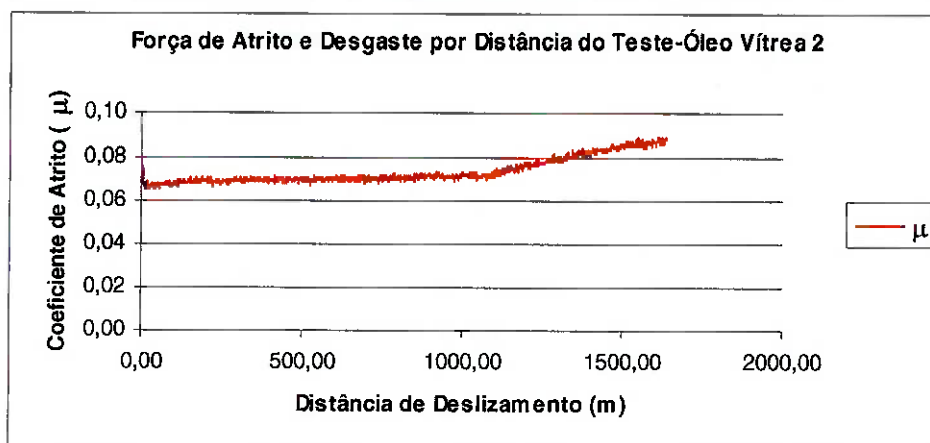
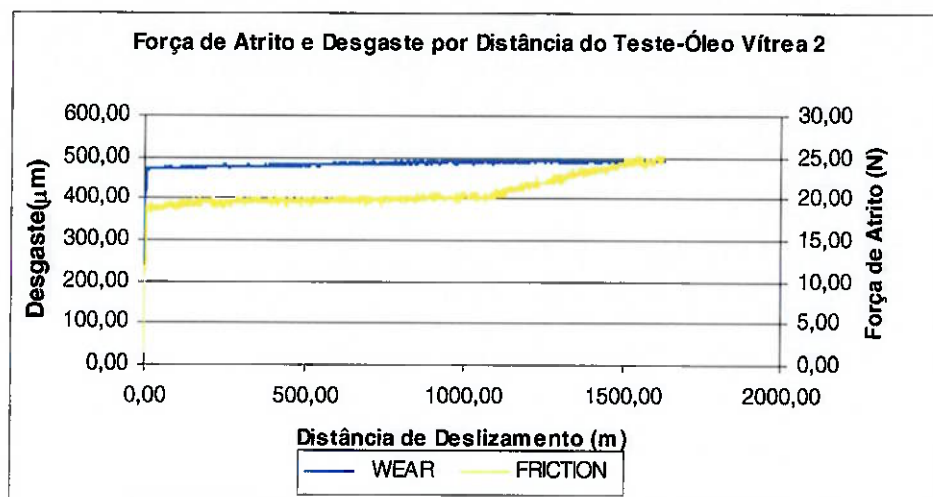


Figura 16: Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo Vit2. **Figura 17:** A segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo Vit2. **Figura 18:** A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância do Óleo Vit2.

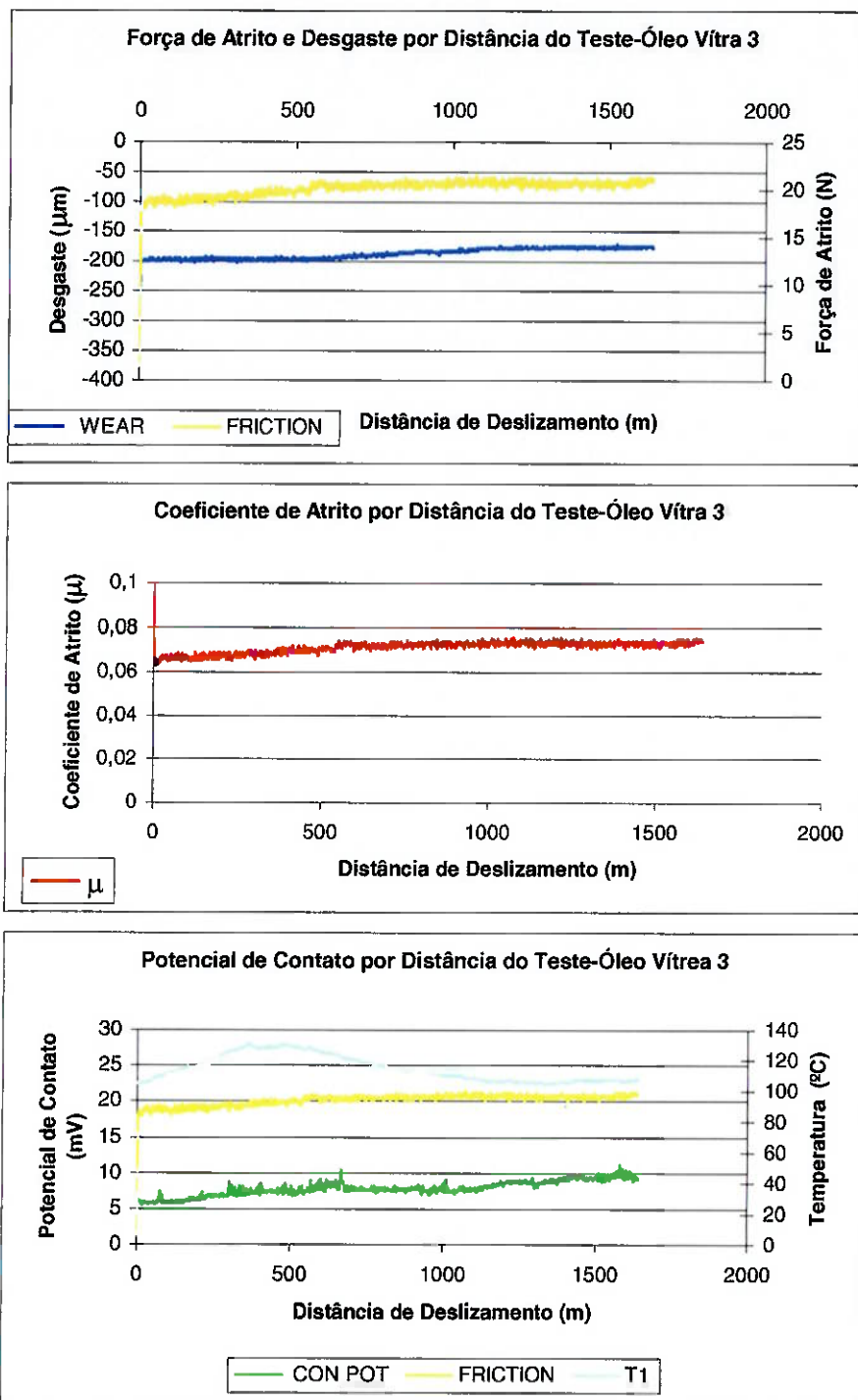


Figura 19: Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo Vit3. **Figura 20:** A segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo Vit3. **Figura 21:** A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância do Óleo Vit3.

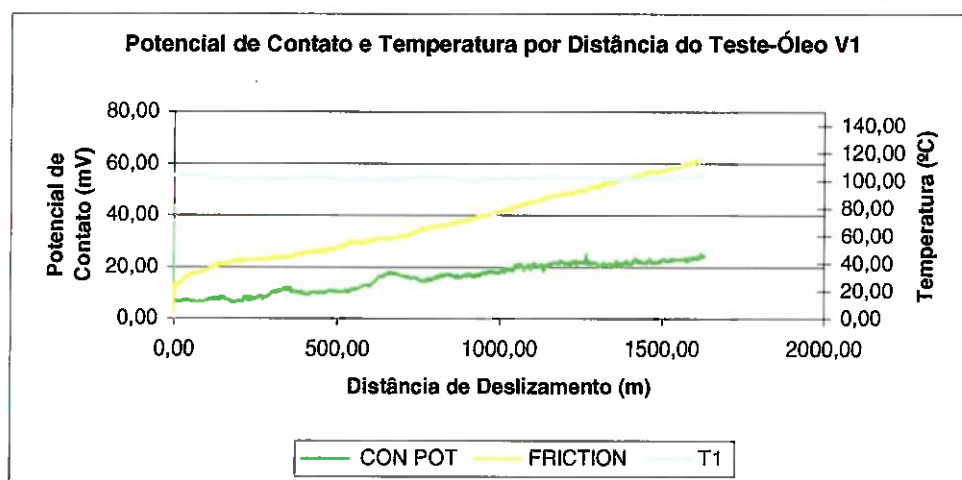
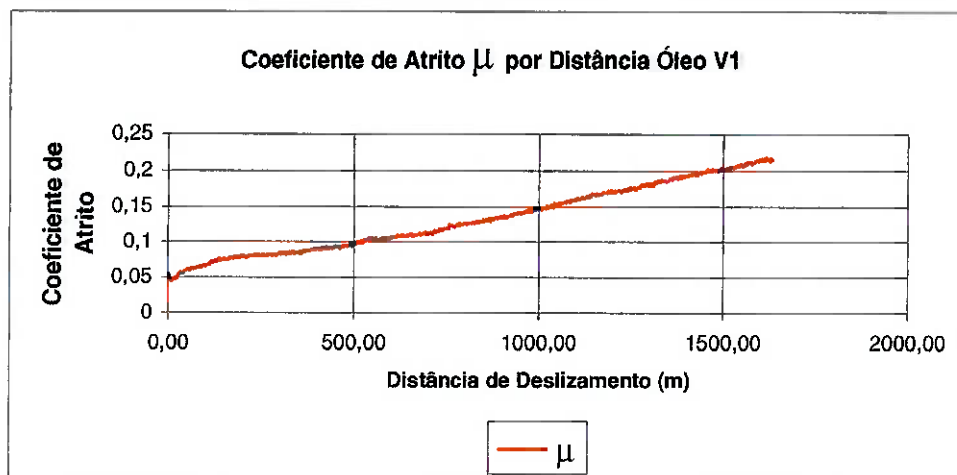
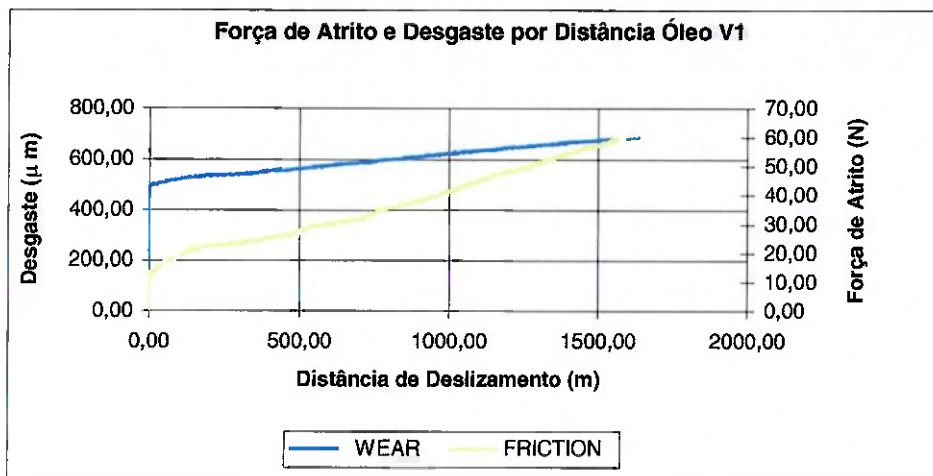


Figura 22: Gráfico de Força de Atrito e Desgaste por distância de ensaio para o óleo V.
Figura 23: A segunda figura mostra gráfico do Coeficiente de Atrito por distância para o Óleo V.
Figura 24: A terceira figura mostra o gráfico de Potencial de Contato e Temperatura por Distância do Óleo V.

As figuras seguintes mostram algumas placas ensaiadas com cada tipo de óleo: Óleo X, Óleo Vítrea e Óleo V.

Placas do Óleo X



Figura 25: Óleo-Placa X1



Figura 26: Óleo-Placa X2



Figura 27: Óleo-Placa X2

Placas do Óleo V



Figura 28: Óleo-Placa V1



Figura 29: Óleo-Placa V1

Placas do Óleo Vítrea



Figura 30: Óleo-Placa VIT1



Figura 31: Óleo-Placa VIT2



Figura 32: Óleo-Placa VIT3

No comparativo seguinte, vemos que a curva de desgaste do óleo Vítrea é parecida com a do Óleo X, porém o óleo X apresenta um desgaste maior. Ao mesmo tempo, vemos pelas curvas de coeficiente de atrito, que óleo X se sobressai em relação ao Vítrea, apresentando uma curva de coeficiente de Atrito por distância de ensaio significativamente menor que a do Óleo Vítrea.

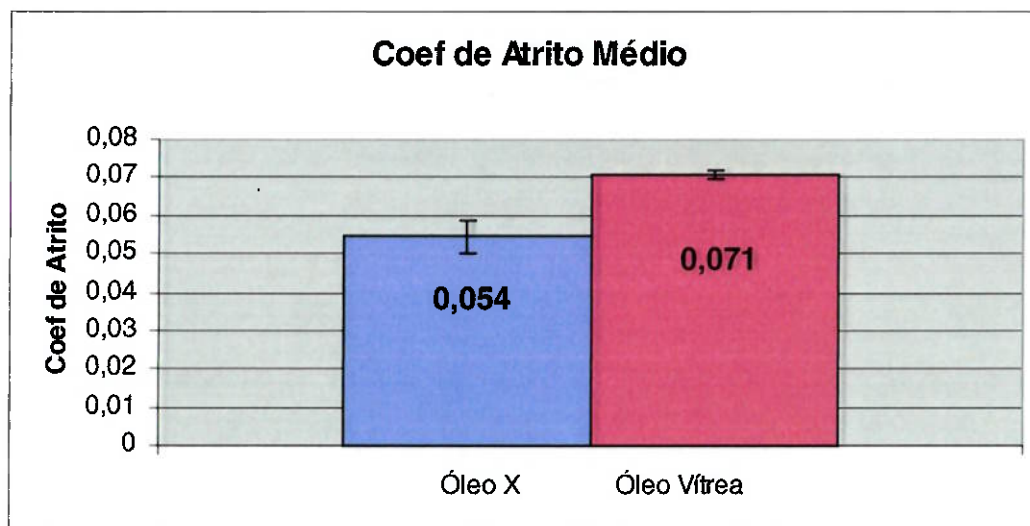
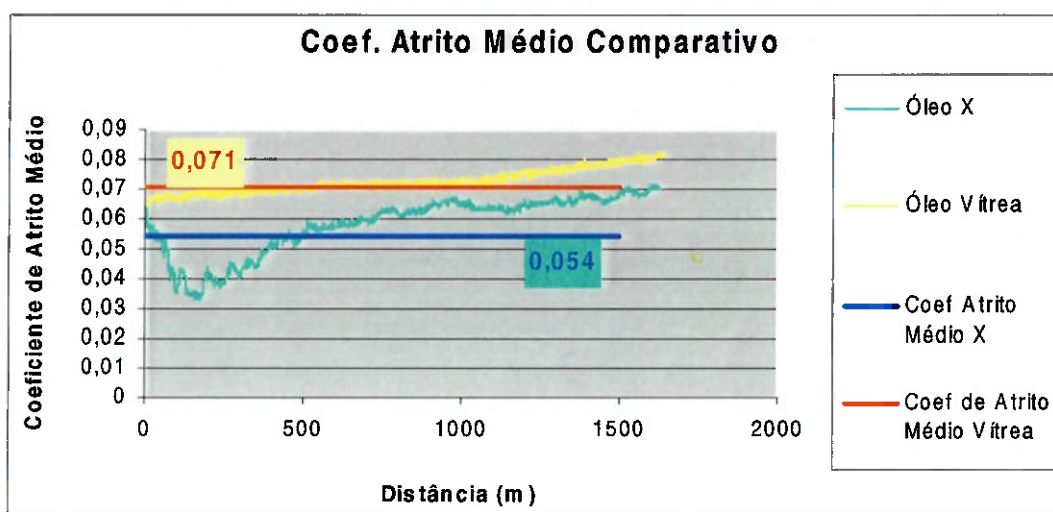


Figura 33:Gráfico Comparativo de Coeficiente de Atrito Médio obtido por Distância para os óleos X e Vítrea **Figura 34:**Gráfico de comparação do Coeficiente de Atrito Médio com os respectivos desvios.

O óleo V, como pode-se notar a seguir, apresentou resultados bem distintos dos óleos X e Vítrea, e, sendo assim, seus resultados serão usados para fins comparativos, para demonstrar a nítida diferença de desempenho – desempenho inferior. Além do fato de que os resultados obtidos com o óleo V quando colocados com os resultados dos óleos X e Vítrea impedem uma boa comparação por ter, como já explicado, valores muito diferentes e um mau desempenho.

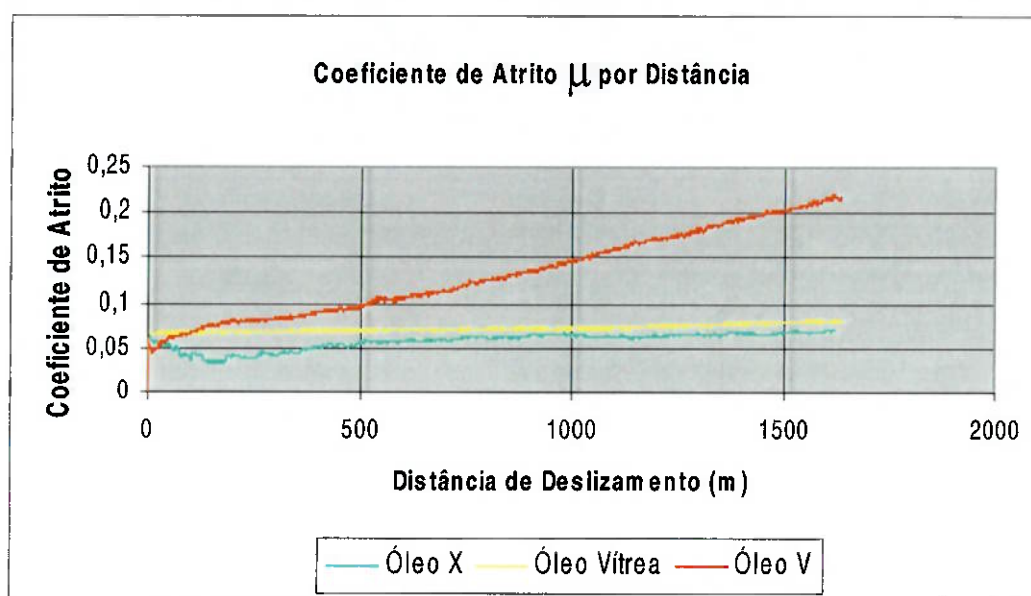


Figura 35: Gráfico Comparativo de Coeficiente de Atrito Médio obtido por Distância para os óleos X e Vítrea e V, evidenciando a grande diferença do Óleo V para os outros dois óleos.

No gráfico a seguir é possível fazer uma comparação com a curva de atrito médio do óleo X e com uma curva de atrito de uma junta sinuvial de um rato10. Podemos notar que as curvas tem desenho parecidos e se levarmos em conta que o óleo X trabalhou a uma temperatura de 100°C e com uma carga de 283N em uma pequena área de contato, e ainda que, se compararmos os tempos que os dois lubrificantes – Óleo X e Líquido Sinuvial – levam para sair de um coeficiente de atrito de 0,05 e atingir o coef. De atrito 0,07, notaremos que a junta do rato levou cerca de 70 min, e o óleo X levou cerca de 140 minutos; o dobro do tempo com condições muito mais severas. Assim, pode-se sugerir que o óleo X, como proposto, tem características tribológicas similares às do líquido sinuvial.

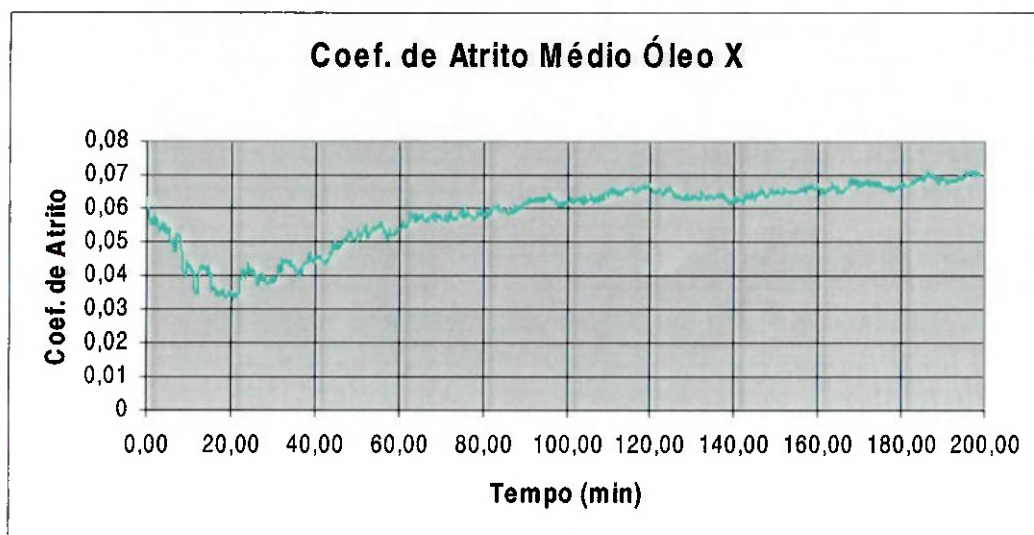


Figura 36:Gráfico do Coeficiente de Atrito do Óleo X por Tempo.

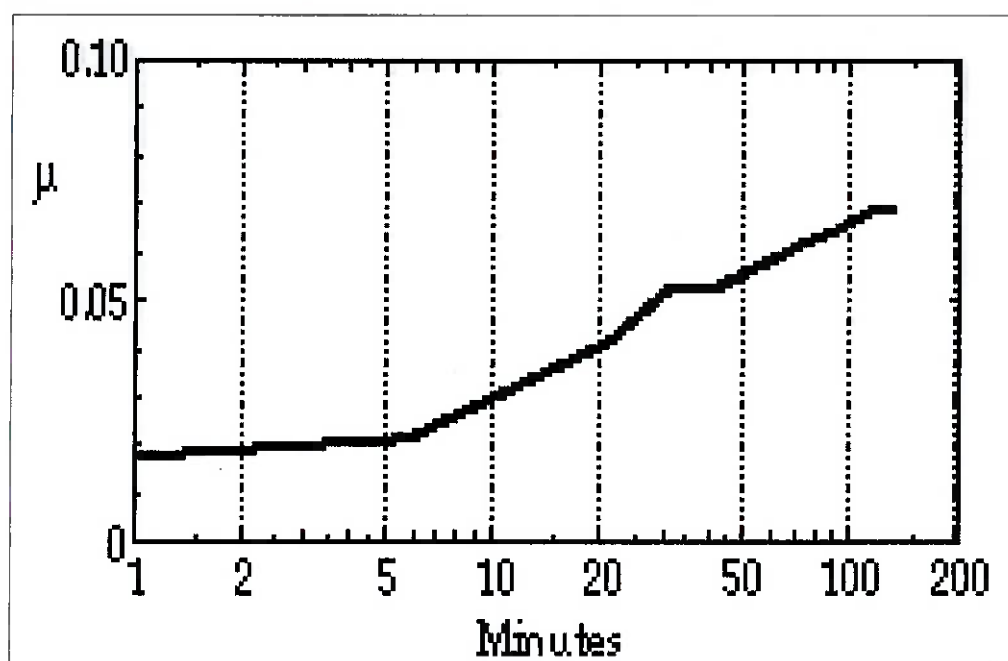


Figura 37:Gráfico do Coeficiente de Atrito de uma junta sinovial de rato por Tempo⁽¹¹⁾

- Resultados da Análise de Perda de Massa

Antes e após os ensaios as placas e os pinos foram pesados, e os valores se encontram na tabela 3.

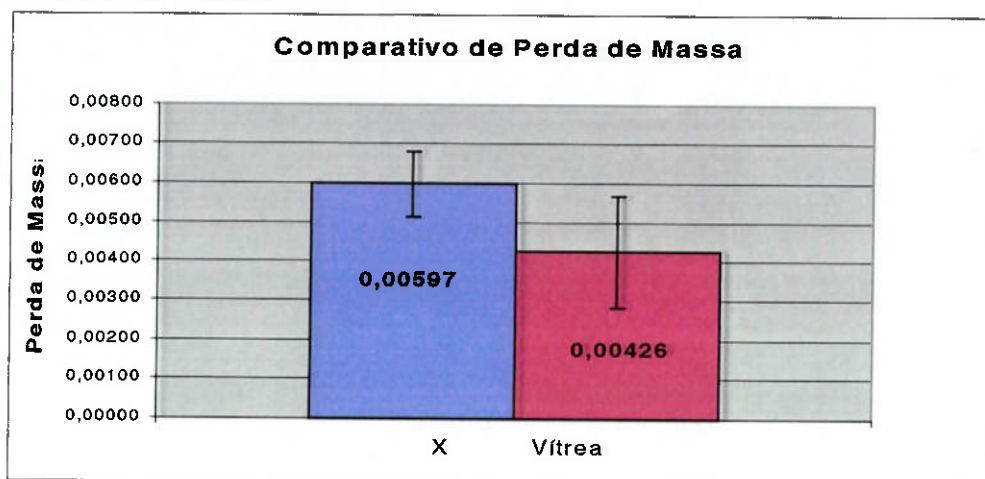


Figura 38:Gráfico comparativo de perda de massa das placas ensaiadas com óleo X e Vítrea

Pelos gráficos acima podemos perceber que o em média o Óleo X teve uma desgaste maior que o Óleo Vítrea, uma vez que apresenta uma diferença de massa maior. Porém, pela grande incerteza, não podemos afirmar que há uma diferença significativa entre as médias de perda de massa das placas dos diferentes óleos ensaiados. No entanto, essa incerteza pode vir do fato de que a amostra é pequena demais, sendo necessário, para comprovar que a diferença é significativa, mais ensaios.

E, quando colocamos o resultado do óleo V, vemos a clara diferença entre os óleos X e Vítrea para o óleo V. Sendo que este último apresenta uma perda de massa consideravelmente maior que a dos dois primeiros.

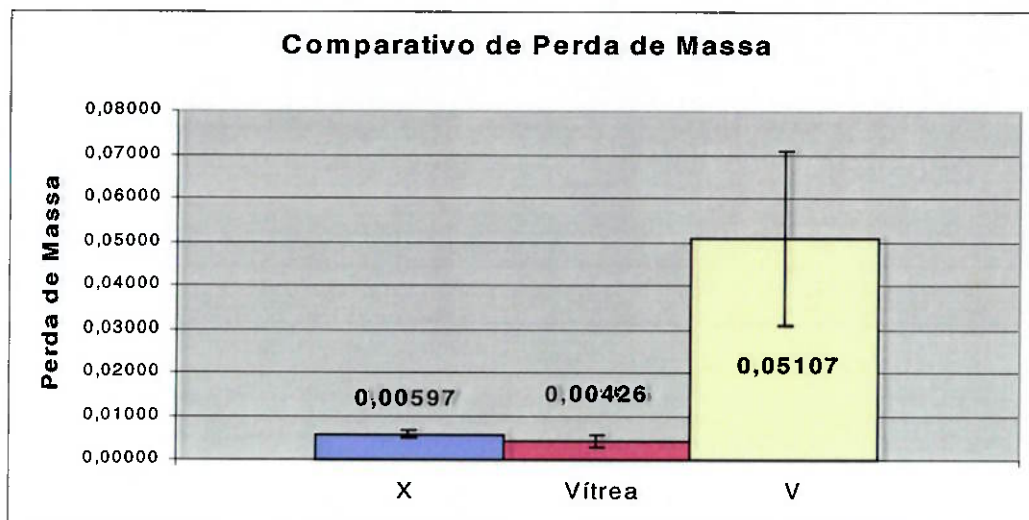


Figura 39:Gráfico comparativo da perda de massa das placas ensaiadas com óleo X, Vítrea e V

Os gráficos de perda de massa dos pinos não serão necessários pois a como entre os pinos não houve praticamente um desgaste significativo pela análise de perda de massa, seus gráficos são barras na nível zero, embora na Microscopia os pino apareçam bastante riscados. Isto é do fato de que os pinos eram de material muito mais resistentes que as placas.

- Resultados da Espectrometria

Foi feita uma análise de espectrometria de massa, pelo Laboratório de Ensaios em Óleos Lubrificantes e Combustíveis do SENAI, das amostras de óleos Vítrea, X e X com Água ensaiados e das amostras de Óleo Vítrea, X novos, uma vez que o óleo X com 20% de Água apresentará a mesma composição do Óleo X, a menos da quantidade de água.

Nessa análise esperava-se verificar principalmente a quantidade de Ferro -- partículas até 40 microns -- da placa que se misturou ao óleo, sendo que uma quantidade maior indicaria um maior desgaste, auxiliando assim a diminuir as incertezas da análise de perda de massa.

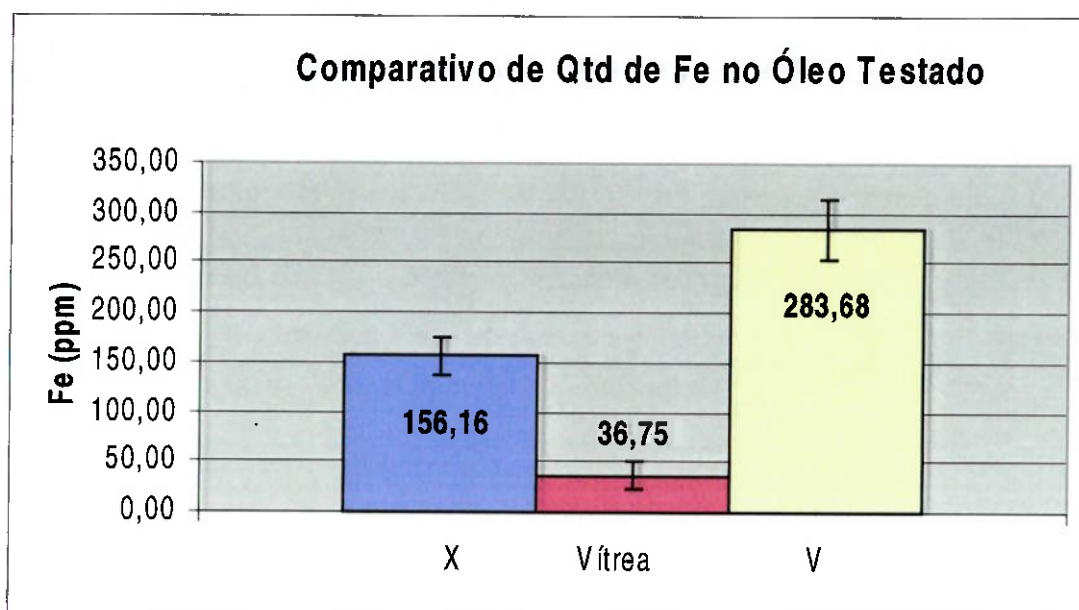


Figura 40: Gráfico Comparativo da quantidade de Ferro encontrada nos Óleos testados pela análise de espectrometria de massa.

Pela figura acima pode-se perceber que houve um aumento nítido da quantidade de Ferro no óleo X ensaiado em relação ao óleo X novo. Podemos notar também que o óleo Vítrea apresentou um certo aumento, mas significativamente menor do que o do óleo X. E como esperado, o óleo V apresentou o maior aumento da quantidade de ferro.

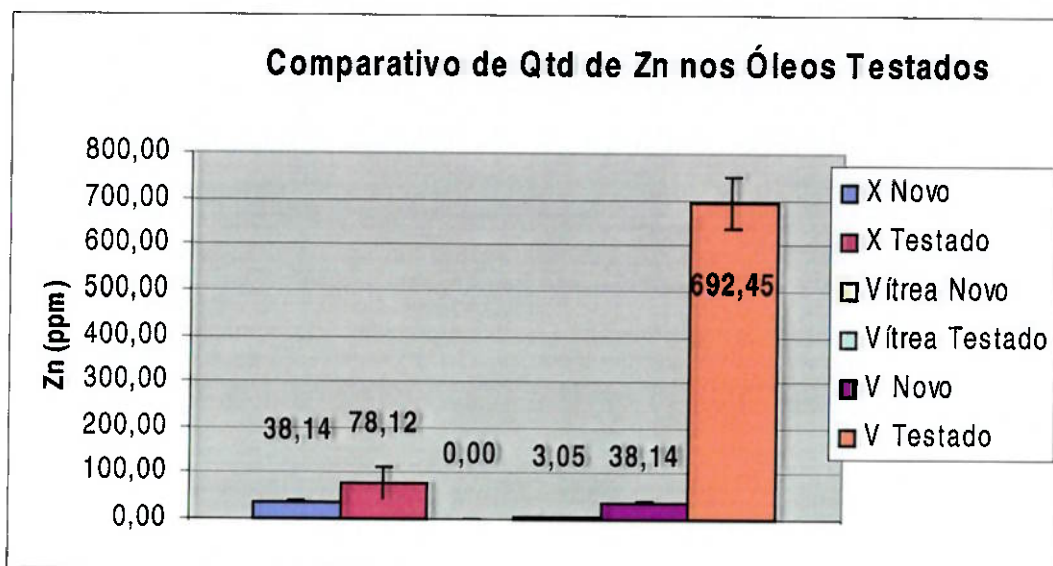


Figura 41: Gráfico comparativo da quantidade de Zinco encontrada nos Óleos testado pela análise de espectrometria de massa.

O gráfico acima mostra o aumento da quantidade de Zinco na composição dos óleos ensaiados em relação aos óleos novos. Vemos que tanto nos óleos X como no Vítrea, o aumento, se consideradas as incertezas, não foi significativo. Sendo a própria quantidade inicial encontrada nos óleos novos, uma confusão de espectros ou incertezas do equipamento.

No entanto, as amostras de óleo V mostram um significativo aumento da quantidade de zinco na composição do óleo V ensaiado, fato que não poderia ocorrer, uma vez que em sua composição inicial, derivada do Óleo X, cuja composição já foi mostrada, foi adicionado apenas água, e portanto não poderia haver Zn. E mais, caso o zinco estivesse presente na composição do óleo X, por alguma contaminação, o aumento também seria visto nos resultados do óleo X, o que não ocorreu, considerando os erros.

Sendo assim, a outra hipótese seria a de contaminação da água colocada no óleo V, . Pela suposição de que a não havia ocorrido contaminação, e que, assim, a composição do óleo V seria a mesma do óleo X – a menos da água – não foi feita uma análise de espectrometria para amostras de Óleo V (Óleo X com 20% de água), podendo o óleo V novo, na verdade, possuir uma grande quantidade de Zn, e não o

valor que foi atribuído; considerando o óleo V novo com a mesma composição do Óleo X novo – a menos da água.

- Resultados da Microscopia

Os exames de Microscopia foram realizados para todos os pinos e placas ensaiados, porém pelo grande quantidade de fotos obtidas, e que são um pouco repetitivas, não serão mostradas todas, apenas as relevantes para o trabalho.

As seis primeiras são fotos das pistas de desgaste dos óleos X e Vítrea, respectivamente, com aumento de 50x.

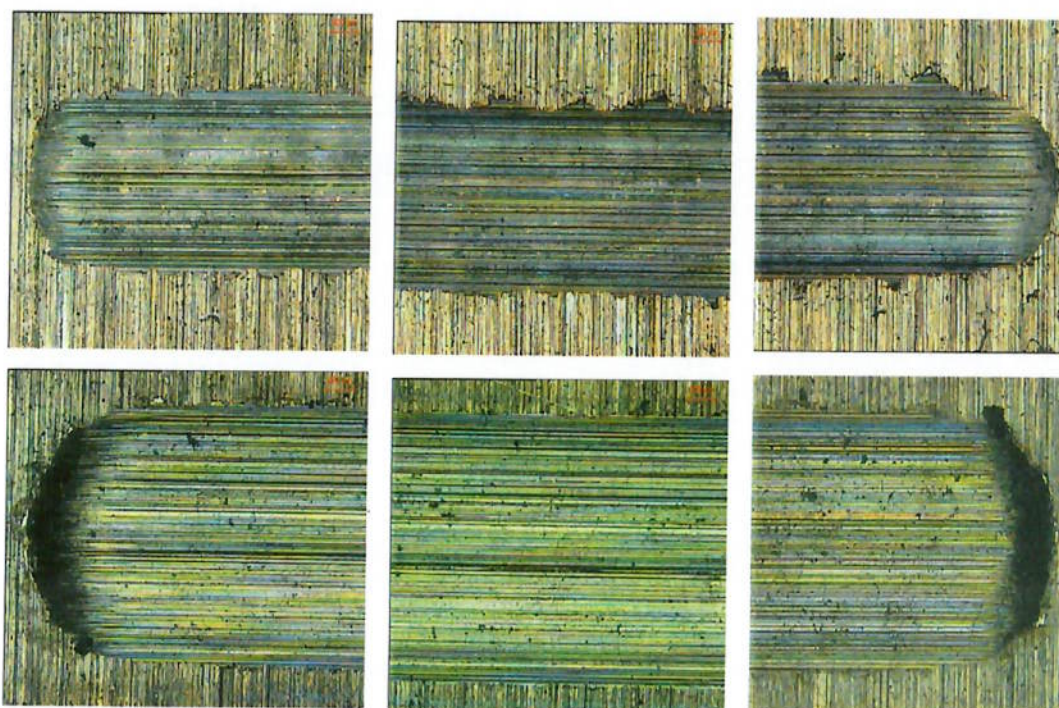


Figura 42: Comparativo das fotos obtidas por microscopia com aumento de 50x da pista de desgaste das placas ensaiadas. A linha superior são as fotos da pista de desgaste das placas ensaiadas com óleo Vítrea e a linha inferior com o óleo X

Podemos notar prontamente algumas diferenças entres pistas de desgaste dos dois óleos.

Nas bordas da pista de desgaste do óleo Vítrea podemos notar uma maior deformação se comparadas as bordas das placas ensaiadas com óleo X. A coloração

diferente também pode ser notada, provavelmente devido à composição do óleo. Os riscos na pista de desgaste sugerem um desgaste abrasivo, pelos riscos e microfraturas, que poderão ser melhores visualizados nas fotos seguintes. Nota-se também que as bordas das pistas são significativamente diferentes, apresentando o óleo X uma pista mais aprofundada que a do óleo Vítrea. Nas duas pistas pode-se notar o acúmulo de material nas bordas, e a uniformidade dos riscos causados pelo desgaste.

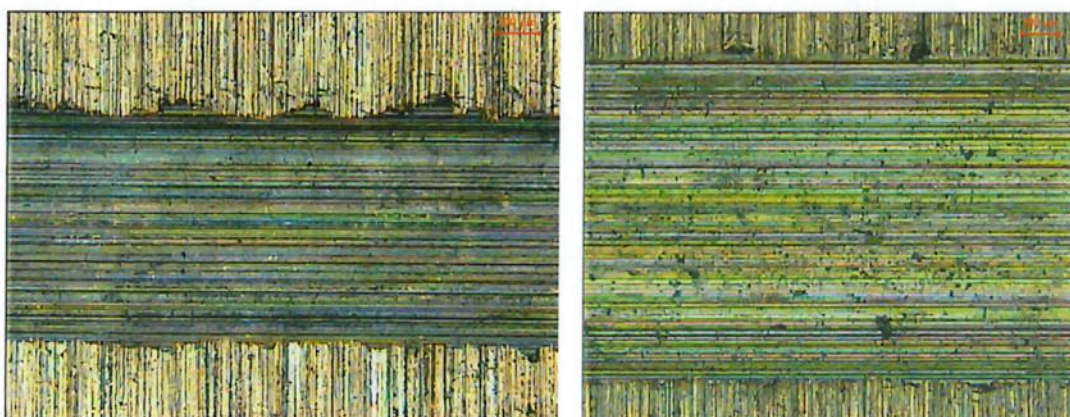


Figura 43: Fotos de microscopia com aumento de 50x do meio da pista de desgaste das placas ensaiadas. Na foto da esquerda a placa foi ensaiada com óleo Vítrea e na da direita com óleo X.

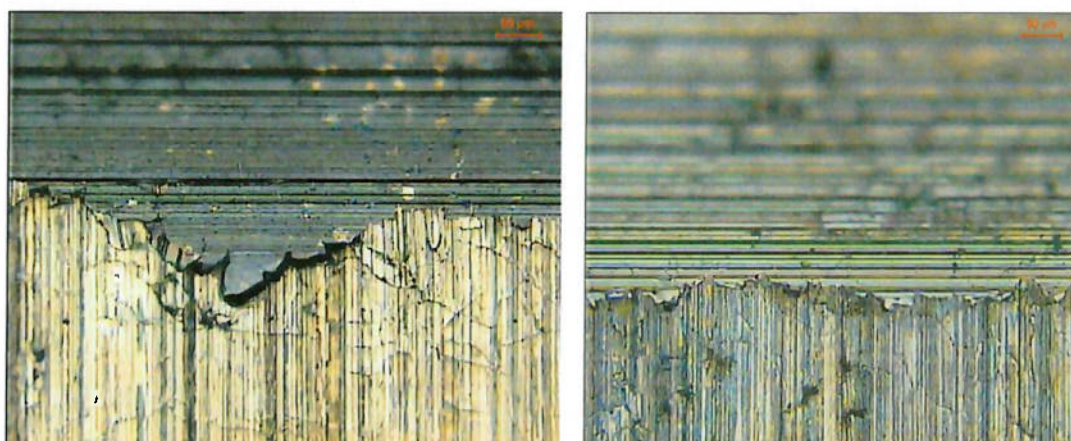


Figura 44: Fotos de microscopia com aumento de 200x da borda inferior da pista de desgaste das placas ensaiadas. Na foto da esquerda a placa foi ensaiada com óleo Vítrea e na da direita com óleo X.

As fotos acima evidenciam a diferença entre o desgaste nas bordas das placas ensaiadas com óleo Vítrea e com Óleo X, apresentando, o óleo Vítrea, uma deformação maior em suas bordas.

As fotos seguintes são do óleo V – X com 20% de água. É nítida a diferença e o maior desgaste, pela maior profundidade da pista. Estas foto também evidenciam o arrancamento de material do meio da pista de desgaste, e a não uniformidade dos poucos riscos da pista, sugerindo um mecanismo de desgaste diferente do que ocorreu com os Óleos X e Vítrea.

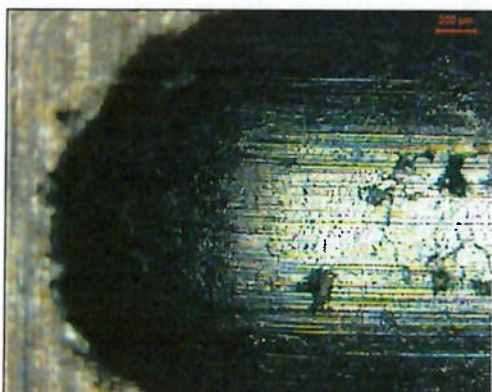


Figura 45: Borda esquerda. Óleo V. Aum. 50x

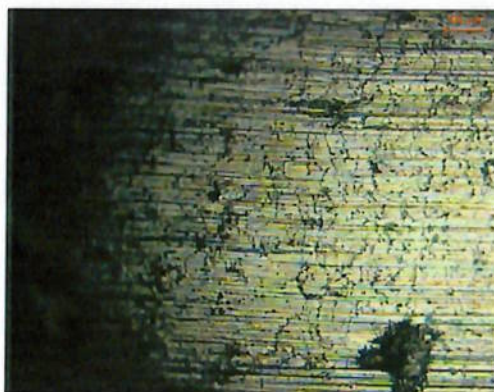


Figura 46: Borda esquerda. Óleo V. Aum 100x

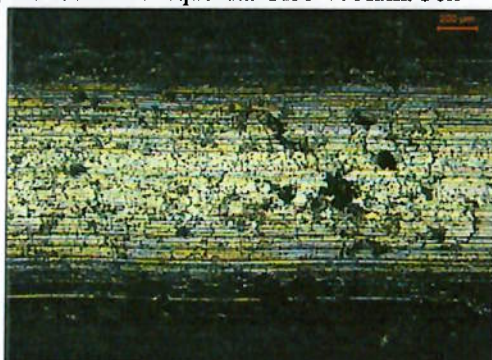


Figura 47: Meio da Pista. Óleo V. Aum. 50x

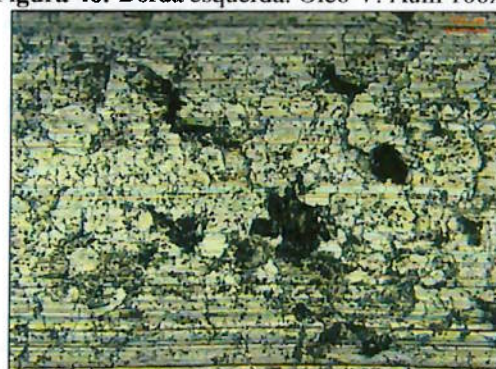


Figura 48: Meio da Pista. Óleo V Aum 100x

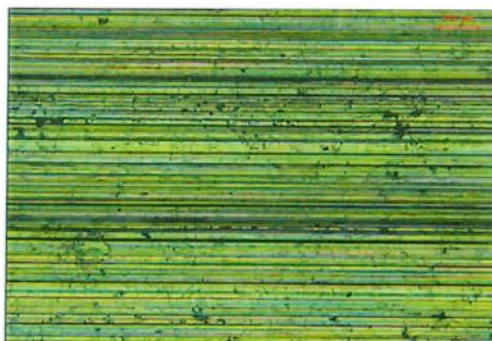


Figura 49: Meio da Pista. Óleo X Aum. 100x

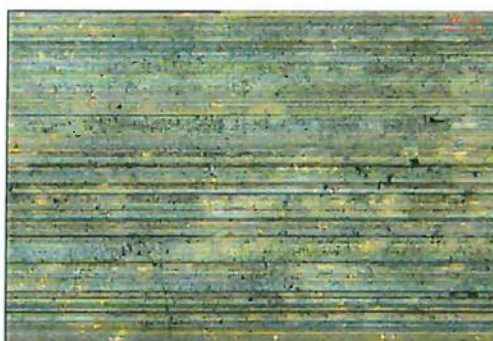


Figura 50: Meio da Pista. Óleo Vítrea. Aum. 100x

Podemos observar o forte arrancamento de material das placas ensaiadas com óleo V em comparando as figuras 49 e 50, placas ensaiadas com óleo X e Vítrea respectivamente.

Pelas fotos seguintes é possível perceber mais claramente o acúmulo de material nas bordas das pistas e também uma quantidade de trincas, em maior número nas fotos do óleo X. Muitos dos pontos escuros é devida a oxidação, pelo fato do material das placas ser Ferro Fundido e se oxidar muito facilmente.

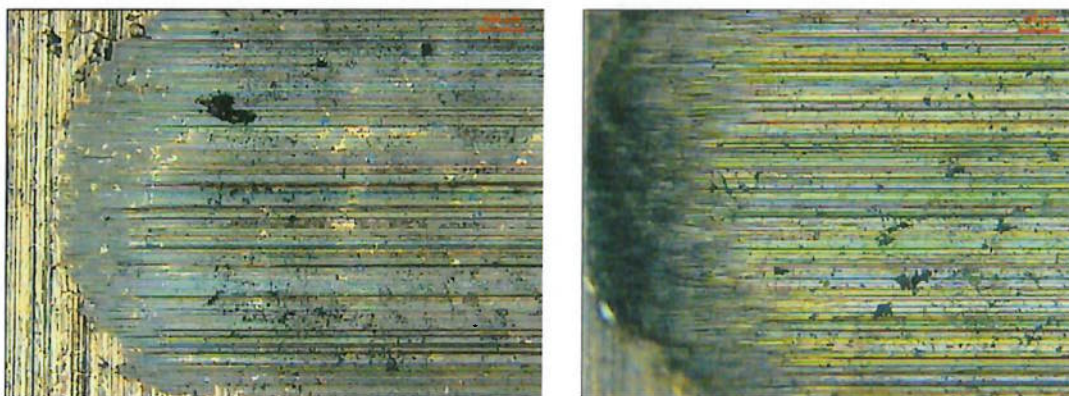


Figura 51: A foto da esquerda apresenta a borda esquerda da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo Vítrea com aumento de 100x. A foto da direita apresenta a borda esquerda da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo X, e aumento de 100x.

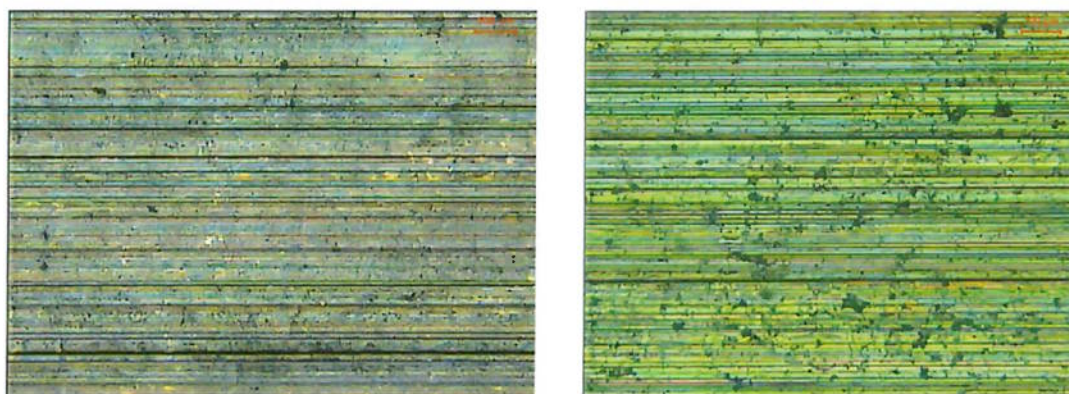


Figura 52: A foto da esquerda apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo Vítrea com aumento de 100x. A foto da direita apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo X, e aumento de 100x.

As próximas fotos mostram uma comparação dos pinos utilizados com as respectivas placas, denotando a similaridade entre o desgaste ocorrido no pino e na placa. Pode-se notar também que o pino está bastante riscado e tanto os pinos utilizados com Óleo X como com Óleo Vítrea possui desgastes regulares, tendo o pino do Óleo X apresentado um desgaste um pouco maior, evidenciado nas fotos com maior aumento.

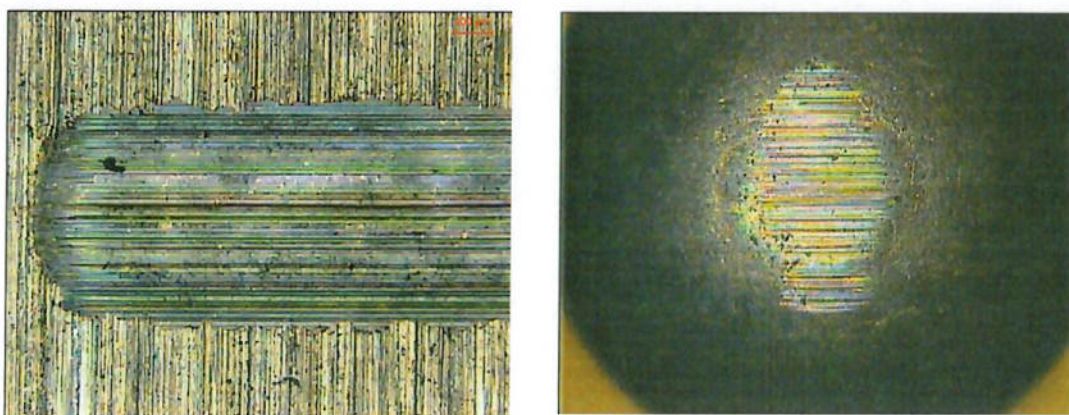


Figura 53: A foto da esquerda apresenta a borda esquerda da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo Vítrea (aumento 50x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 50x)

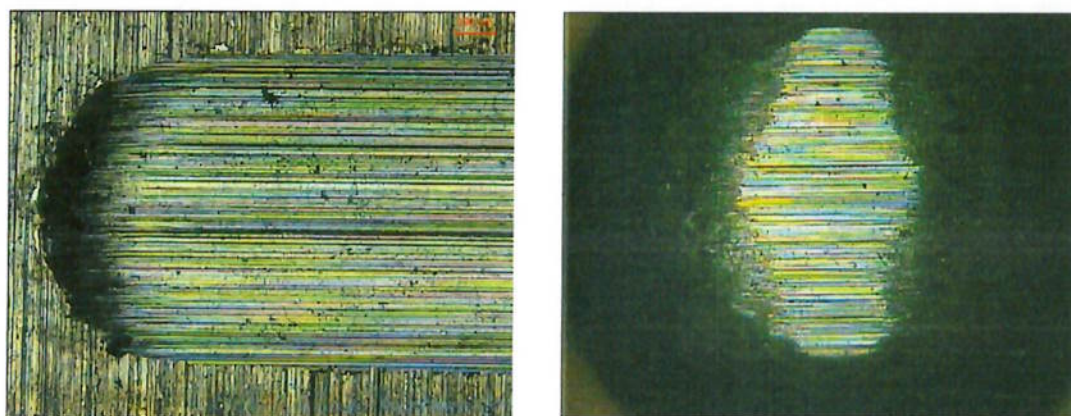


Figura 54: A foto da esquerda apresenta a borda esquerda da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo X (aumento 50x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 50x)

Nas fotos seguintes foram utilizadas as mesmas placas das fotos anteriores, porém as fotos foram retiradas do meio da pista de desgaste com uma ampliação de 100x.

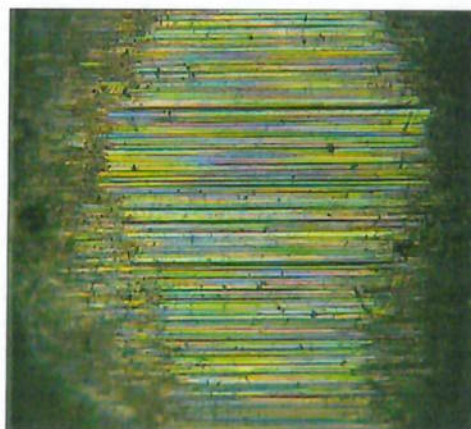
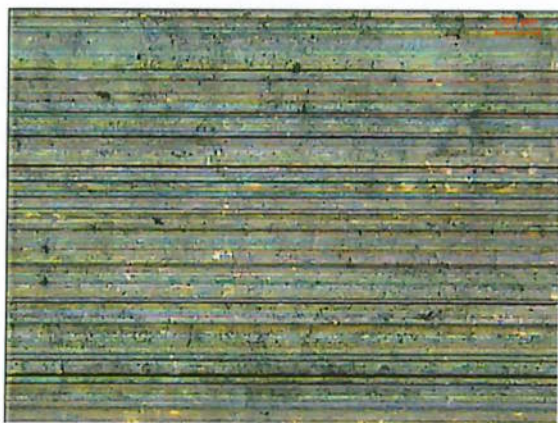


Figura 55: A foto da esquerda apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo X (aumento 100x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 100x)

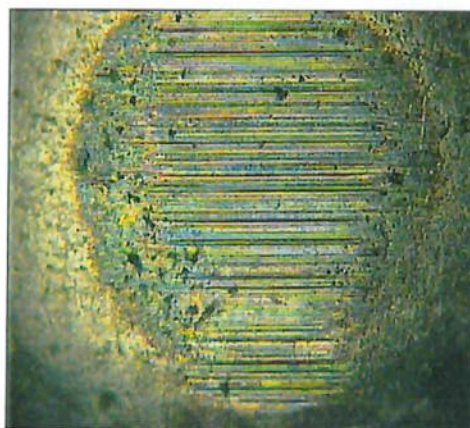
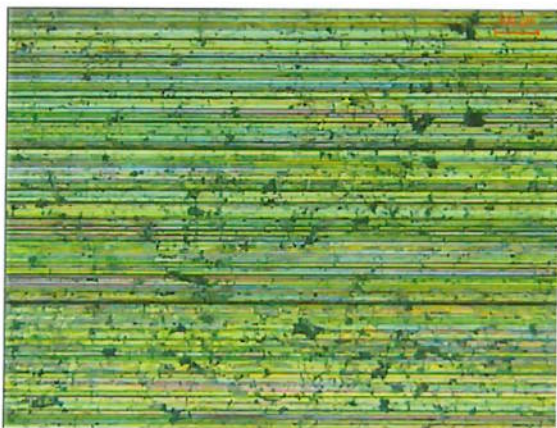


Figura 56: A foto da esquerda apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo Vítrea (aumento 100x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 100x)

As fotos abaixo mostram o desgaste ocorrido nos pinos utilizados nos ensaios com óleo V. Pode-se notar também a diferença nítida de desgaste deste pino em relação aos pinos usados com o óleo x e o óleo Vítrea, apresentando aparentemente uma pequeno arrancamento de material do pino.

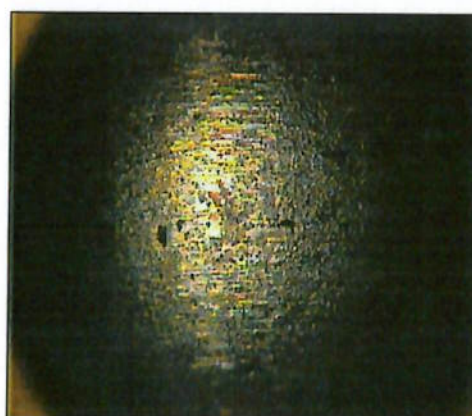
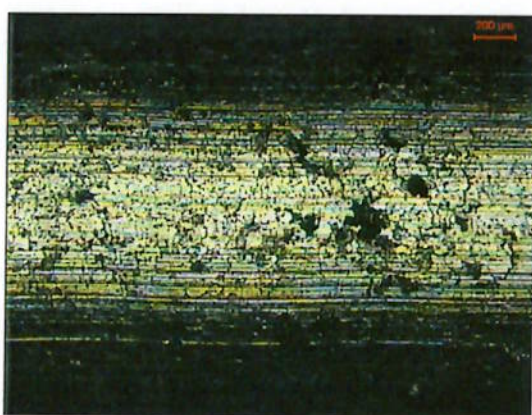


Figura 57: A foto da esquerda apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo V (aumento 50x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 50x)

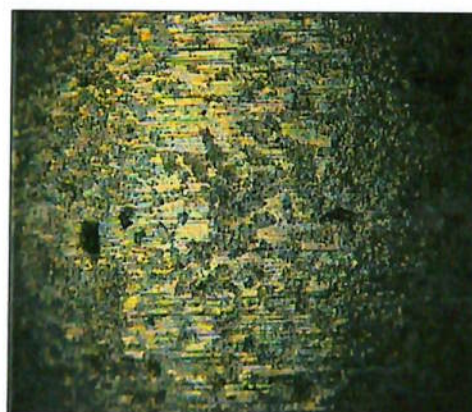
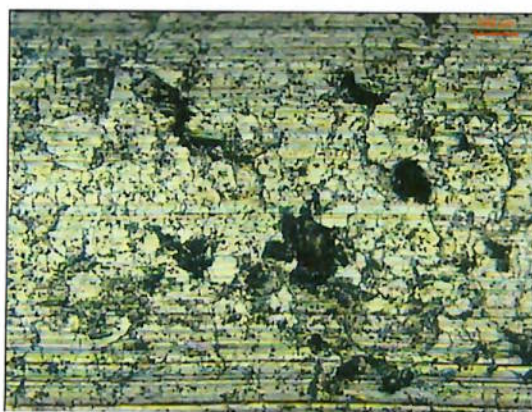


Figura 58: A foto da esquerda apresenta o meio da pista de desgaste de uma placa ensaiada com óleo V (aumento 100x) e a foto da direita apresenta o respectivo pino utilizado no ensaio (aumento 100x)

-Resultados da análise de Perfil de Rugosidade

Para as análises de rugosidade foram feitas 3 medições de perfil de rugosidade para cada placa ensaiada. Os dados do rugosímetro foram adquiridos e apresentados na forma de gráficos. A análise gráfica dos perfis de rugosidade apresentam um desvio baixo e refletem corretamente o perfil das placas, como poder-se-á notar.

A figura xx é o gráfico do conjunto de perfis retirados das placas ensaiadas com óleo Vítrea, e a figura 60 é uma ampliação da parte inferior do vale da pista do gráfico da figura 59.

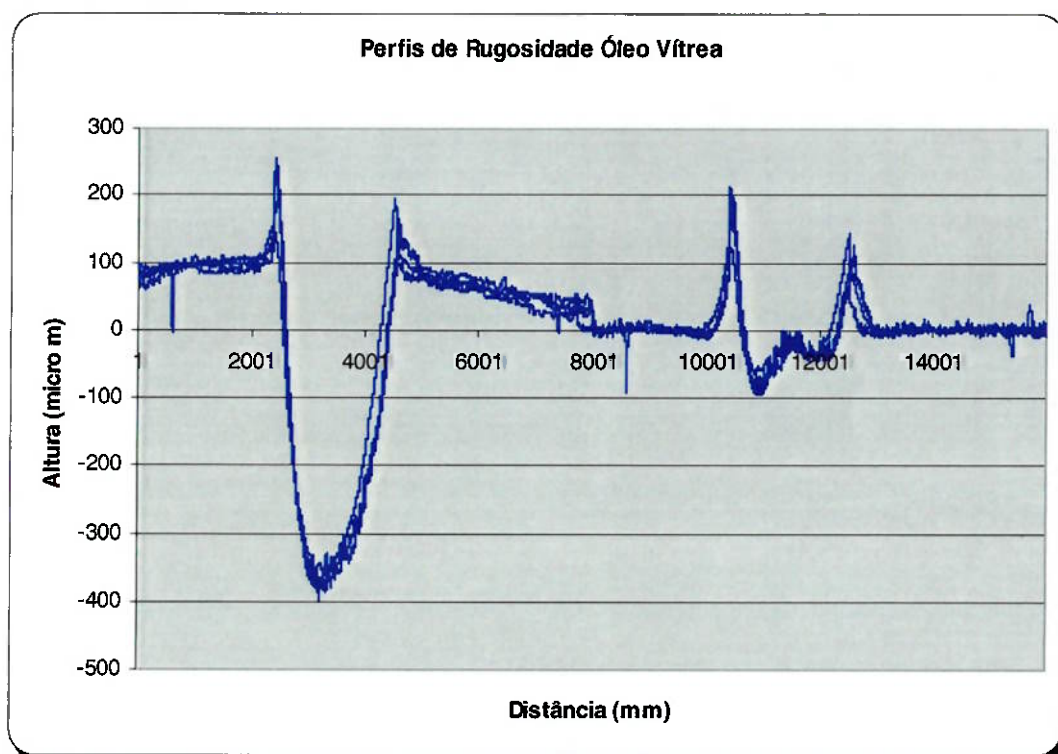


Figura 59: Conjunto dos perfis de rugosidade obtidos das placas ensaiadas com Óleo Vítrea

Por esta figura percebe-se a repetição dos perfis, denotando uma uniformidade das pistas de desgaste.

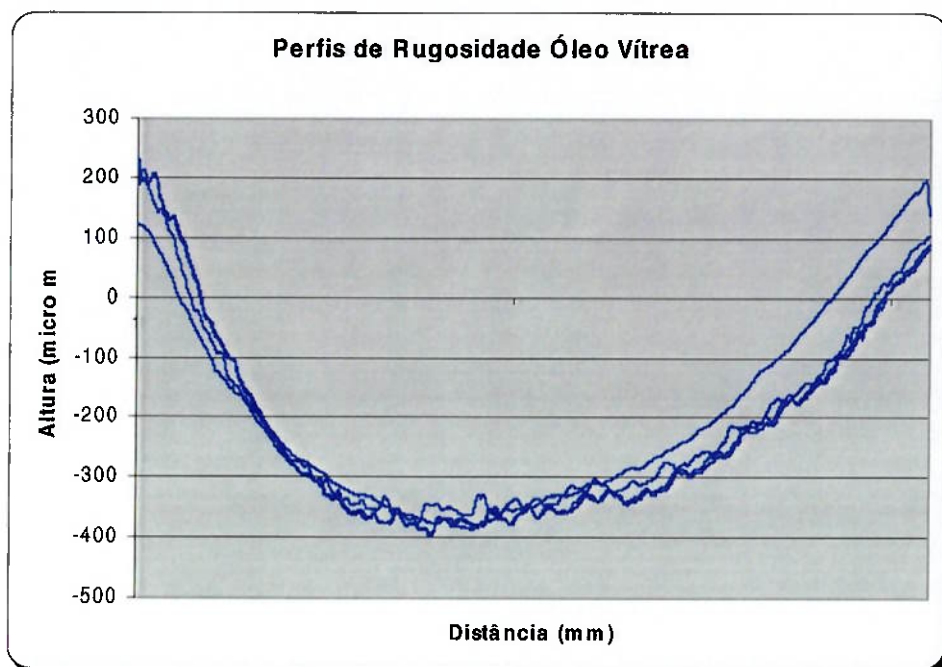


Figura 60: Ampliação do vale do sulco da pista de desgaste mostrado da figura 59

O gráfico seguinte é o perfil de rugosidade das placas ensaiadas com Óleo X, e o segundo gráfico, uma ampliação do vale da pista de desgaste.

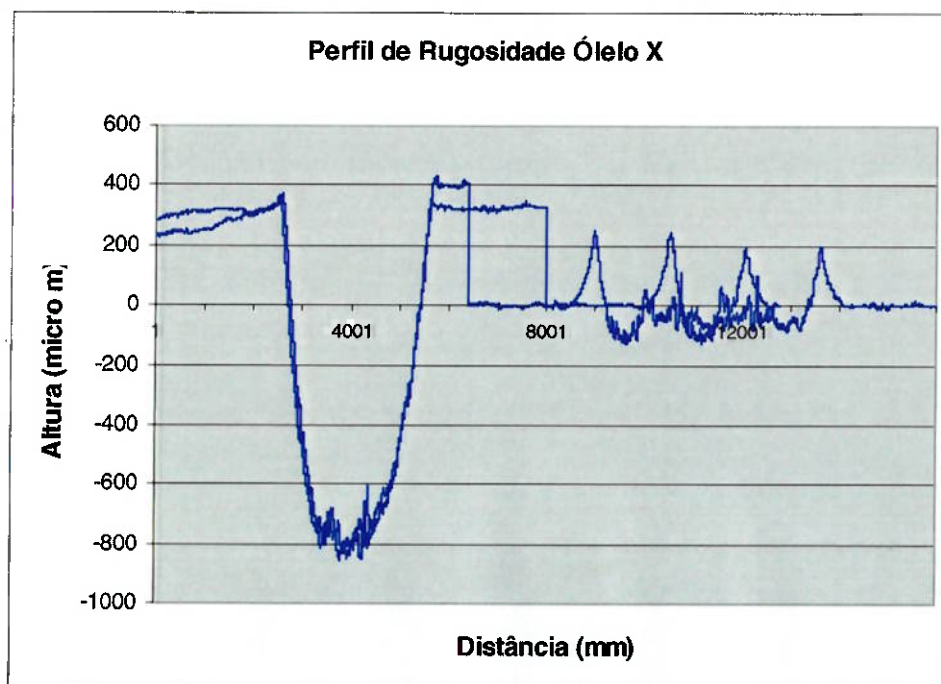


Figura 61: Conjunto dos perfis de rugosidade obtidos das placas ensaiadas com Óleo X

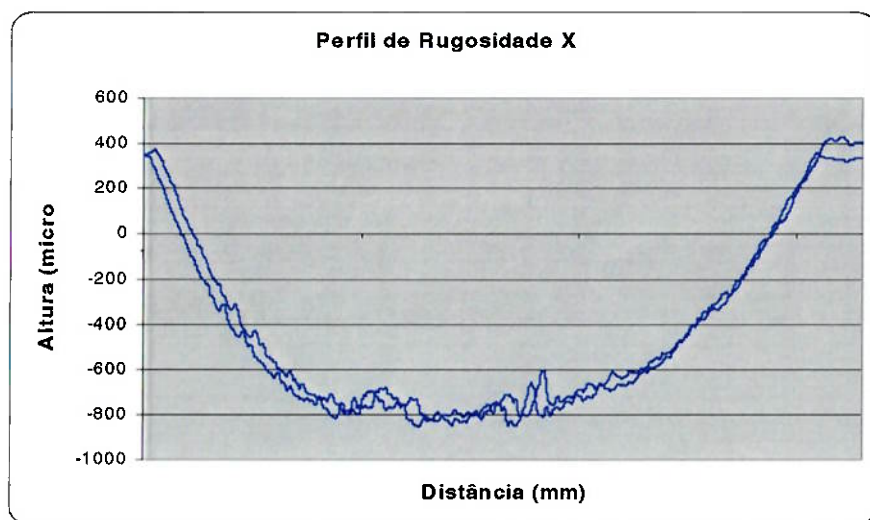


Figura 62: Ampliação do vale do sulco da pista de desgaste mostrado da figura 61

O gráfico seguinte é uma comparação dos perfis obtidos com os óleos Vítrea e X, evidenciando claramente o maior aprofundamento da pista de desgaste do óleo X, e conseqüentemente um maior desgaste.

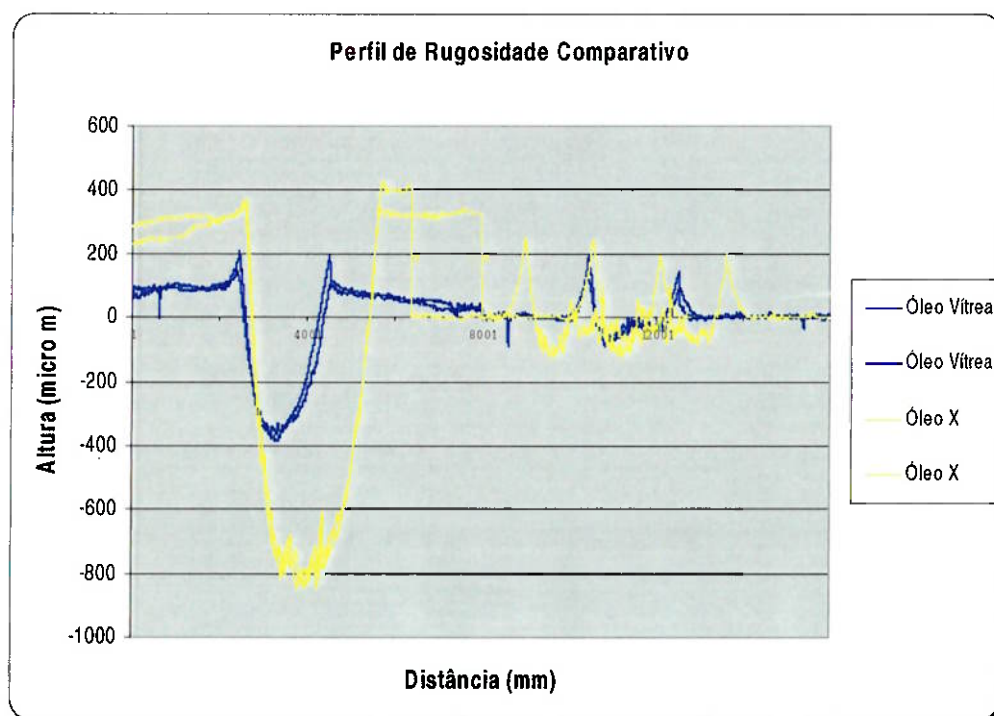


Figura 63: Conjuntos de perfis de rugosidade obtidos das placas ensaiadas com Óleo X (amarelo) e Vítrea (azul)

DISCUSSÃO

A primeira observação que pode ser feita a partir dos gráficos é a diferença nítida de comportamento dos diferentes óleos lubrificantes. Como esperado o de “pior” desempenho, considerando o crescimento acentuado do coeficiente de atrito e desgaste, foi o do Óleo com 20% de água em sua composição. O Óleo X mostrou um maior tempo para se estabilizar, diferentemente do Vítrea que se estabiliza rapidamente.

Considerando a elevada carga, e a diferença acentuada dos materiais em contato, pode-se dizer que o desgaste foi pequeno para o Vítrea e o Óleo X. O óleo V apresentou um desgaste bem maior quando com parado aos outros dois, evidenciado praticamente por todos os resultados obtidos. Pelas fotos das placas, é possível notar claramente a diferença de mecanismo de desgaste ocorrida com o uso do óleo V, e também que, na placa do óleo V o sulco é bem maior, fato que não foi mostrado no perfil de rugosidade justamente por ser exageradamente maior, deformando o gráfico comparativo.

Podemos notar, também pelas fotos sem aumento das placas, a semelhanças entre a disposição das partículas ao final do desgaste. Todas placas do óleo X apresentaram as partículas dispostas lateralmente, enquanto as do óleo V as apresentaram dispostas acompanhando o sulco e no sentido para baixo. No entanto, pelas fotos da microscopia tanto as pistas do Óleo X como do Óleo Vítrea apresentaram acúmulo de material nas bordas dos sulcos. As placas do óleo V (com água) não apresentaram nenhuma partícula disposta na placa, mas apresentou um severo arrancamento de material da pista de desgaste, explicando a coloração escura do óleo usado e a grande quantidade de Ferro na análise de espectrometria de massa.

Podemos notar também pelos gráficos que a temperatura dos Óleos Vítrea e X sobem um pouco acima da temperatura estipulada de 100 °C porém estabilizam-se poucos momentos depois e não interferem nos demais resultados significativamente, e que, as temperatura do Óleo V (com água) não apresenta esta transição, indicando uma possível influência refrigerante da água.

O coeficiente de Atrito nos óleos Vítrea e X mantiveram-se baixos ~ 0.08 ao final do teste, com o óleo X conseguindo manter por bastante tempo Coeficientes de Atrito de $\sim 0.03-0.05$, e concluindo os ensaios com coeficientes de atritos ainda baixos. E como esperado o Coeficiente de Atrito do óleo V atingiu níveis bem superiores. Como foi dito anteriormente, os coeficientes de juntas humanas, devido ao ácido hialurônico são de ~ 0.001 , o Óleo X que foi desenvolvido para acompanhar este valor, não apresentou valores próximos a 0.001 mas comparado com dados reais de uma junta sinuvial de um rato, conseguiu não só uma curva de coeficiente de atrito semelhante como também conseguiu manter coeficientes de atritos mais baixos por mais tempo. Provavelmente pela grande diferença de estrutura que ainda há entre as moléculas, como por exemplo a falta de grupos de com nitrogênio e pela falta da cadeia cíclica, pequenos ajustes que são fáceis de realizar, óleo X ainda não está pronto, mas a molécula básica se comportou como esperado. E o óleo V, que teve uma desempenho pior, pode ser melhorado com aditivação, para que ao final tenha-se um óleo lubrificante hidrossolúvel de alto desempenho.

RESUMO DAS CONCLUSÕES

- Apenas pelos gráficos do equipamento TE67, e um número de ensaios pequenos é possível observar a diferença de comportamento que há entre os óleos testados.
- O óleo com 20% de água , como esperado, teve um desempenho nitidamente inferior neste tipo de ensaios e nestas condições de teste que os outros óleos testados
- Pela análise de Perda de massa não se pode concluir uma diferença significativa entre os óleos X e Vítrea. Fato que pode ser devido ao pequeno número de ensaios realizados.
- Pela espectrometria dos óleos o maior desgaste ocorrido com o óleo X, em relação a Vítrea, fica evidenciado pela maior quantidade de Ferro encontrada em sua amostra ensaiada. No Óleo V conforme o esperado, a quantidade é bem maior.
- A grande quantidade de Zn no encontrada no óleo V, conforme já explicado, deve-se provavelmente à contaminação da água dissolvida no Óleo X
- O tempo de estabilização dos óleos Vítrea e X são bem diferentes, fato observado pela instabilidade do óleo X nos primeiros momentos dos ensaios
- Os coeficientes de atrito do Óleo X ficaram bem abaixo dos do Óleo Vítrea.
- A microscopia evidenciou o diferente mecanismo de desgaste entre os Óleo X e Vítrea em relação ao óleo V. Os Óleos X e Vítrea apresentaram marcas de abrasão na pista de desgaste, acúmulo de material nas bordas e pequenas micro-fraturas na pista de desgaste. O óleo Vítrea apresentou a região das bordas muito mais deformadas que as bordas do Óleo X. Porém o Óleo X apresentou um desgaste mais acentuado, fato observado pelo perfil de rugosidade das placas.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para a continuação dos trabalhos estão as análises de corte longitudinal das placas, no meio das pistas de desgaste, afim de analisar a possível deformação do material e posterior análise com MEV. A aditivação dos Óleos X e V seriam interessantes para tentar fazer com que o Óleo V tenha um desempenho melhor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. HUTCHINGS, I.M. **Tribology: Friction and Wear of engineering materials**. Edward Arnold, Great Britain, 1992.
2. FULLER, D.D. **Theory and Prattice of Lubrication for Engineers**. John Wiley & Sons, USA, 1984.
3. HALLING, J. **Principles of Tribology**. The Macmillan Press LTD. Hong Kong, 1983.
4. RABINOWICZ, E. **Friction and Wear of Material**. John Wiley & Sons, USA, 1964.
5. MOURA, C.R.S.; CARRETEIRO, R.P., **Lubrificantes e Lubrificação**. Makron Books, Brasil, 1998
6. MARU, M.M, **Estudo Tribológico do Aço Inoxidável Nitretado contra Ferro Fundido Cinzento em Máquina de Ensaio de Desgaste com Movimento Alternado**, Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1998.
7. KRIM, J. **Atomic Scale Origins of Friction**, Northeastern University, Boston, Massachussets, 1996
8. ASM **HandBook**, 10 edn, vol 18, 1992
9. Merck Index
10. University of Washinton, **Orthopedics and Sports Medicine**, Joints. USA, 2002.
11. University of Western Australia, **School of Mechanical Engineering**, Study of Sinuvial Joints, 2002