

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

HELOÍSA COLLI MOREIRA

**UM ESTUDO PRELIMINAR DA RELAÇÃO ENTRE FERROGRAFIA E ANÁLISE
DE DESGASTE EM SISTEMAS LUBRIFICADOS DE METAIS COM VARIADOS
NÍVEIS DE OXIDAÇÃO**

CURITIBA

2022

HELOÍSA COLLI MOREIRA

**UM ESTUDO PRELIMINAR DA RELAÇÃO ENTRE FERROGRAFIA E ANÁLISE
DE DESGASTE EM SISTEMAS LUBRIFICADOS DE METAIS COM VARIADOS
NÍVEIS DE OXIDAÇÃO**

**A preliminary study of the relationship between ferrography and wear analysis
in lubricated systems of materials with various oxidation levels**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Giuseppe Pintaúde
Coorientadora: Helena Wilhelm

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

HELOÍSA COLLI MOREIRA

**UM ESTUDO PRELIMINAR DA RELAÇÃO ENTRE FERROGRAFIA E ANÁLISE
DE DESGASTE EM SISTEMAS LUBRIFICADOS DE MATERIAIS COM VARIADOS
NÍVEIS DE OXIDAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/junho/2022

Giuseppe Pintaúde
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Julio Cesar Klein das Neves
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Tiago Cousseau
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que pelo seu infinito amor me concedeu a graça, a força e a coragem necessária para vencer cada etapa.

Agradeço ao meu pai e a minha mãe por tanto amor e paciência, por não me deixarem desistir e por estarem ao meu lado em cada passo.

Agradeço especialmente ao meu professor orientador Prof. Dr. Giuseppe Pintaúde, por todo o suporte, paciência e oportunidade, obrigada por acreditar em mim.

Agradeço a todos os meus amigos pela torcida, por me ajudarem de diferentes formas, por cada palavra de incentivo e por perdoarem meus momentos de ausência. Aos meus colegas de laboratório por todo o apoio prestado de diferentes maneiras.

Agradeço ao Sr. Paulo Fernandes, à Dra Helena Wilhelm, ao Sr. Maurício Mattoso e a toda a sua equipe, pelo apoio à pesquisa, pelos instrumentos e laboratórios que foram colocados à disposição, além da torcida de todos.

Por fim, aos laboratórios da universidade, o CMCM e o LASC, e seus respectivos responsáveis, pela utilização e apoio à pesquisa

“Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas. A ele, pois, a glória eternamente. Amém!” (BÍBLIA; Romanos, 11, 36)

RESUMO

Existem diferentes técnicas e métodos para a avaliação do desgaste de um componente ou sistema mecânico, pode-se avaliar a severidade do desgaste a partir da observação da superfície de interesse, como também pode-se utilizar métodos como a ferrografia analítica que é o estudo das partículas de desgastes que estão em suspensão no óleo lubrificante do sistema. Visando aliar as diferentes metodologias de análise de desgaste, desenvolveu-se um estudo em que as técnicas de ferrografia analítica, interferometria óptica e microscopia eletrônica de varredura foram usadas para quantificar o desgaste gerado em amostras por um ensaio de movimento recíproco num tribometro. Para tanto foram usadas amostras de três materiais diferentes: alumínio, que passou por um processo de anodização gerando uma camada óxidos superficial, aço inoxidável e aço perlítico; e esferas de aço ABNT 52100 como contra corpo. Constatou-se ao final do estudo que a ferrografia analítica aponta o desgaste do par tribológico e não apenas de uma superfície, resultado que foi embasado pelas outras metodologias aplicadas.

Palavras-chave: Ferrografia analítica. Desgaste oxidativo. Lubrificante. Tribologia

ABSTRACT

There are different techniques and methods for the evaluation of the wear of a component or mechanical system, the severity of wear can be evaluated from the observation of the surface of interest, it is also possible to use other methods such as analytical ferrography, which is the study of wear particles that are suspended in the lubricating oil of the system. Aiming to combine the different methodologies of wear analysis, a study was developed in which the techniques of analytical ferrography, optical interferometry and scanning electron microscopy were used to quantify the wear generated in samples by a reciprocal motion test made in a tribometer. For this purpose, samples of three varied materials were used: aluminum, which underwent an anodizing process generating a superficial oxide layer, stainless steel, and pearlitic steel; and ABNT 52100 steel balls as counter body. It was found at the end of the study that the analytical ferrography shows the wear of the tribological pair and not just of a surface, a result that was supported by the other methodologies applied.

Keywords: Analytical ferrography. Oxidative wear. Lubricant. Tribology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: relação do tamanho das partículas com a sua concentração e com o tempo	13
Figura 2: esquematização da preparação do ferrograma.	14
Figura 3: (a) óxidos vermelhos vistos em luz refletida;(b) mesma vis de (a) porém em luz polarizada; (c) outro tipo de óxido vermelho na luz refletida; (d) mesma vista de (c) em luz transmitida.	15
Figura 4: óxidos escuros	15
Figura 5:relação das características das partículas de desgaste com o modo e o mecanismo de formação.	16
Figura 6:Ilustração da formação de óxidos (a) em metais (b) em ligas.....	16
Figura 7: vista ao longo da direção de deslizamento para três condições de desgaste.....	17
Figura 8: contato entre esfera e plano	18
Figura 9: esquematização do funcionamento de um interferômetro CCI.....	20
Figura 10: cuba para os ensaios	21
Figura 11: interferômetro CCI Taylor Hobson.	21
Figura 12: imagens de interferometria das pistas, após threshold (a) do alumínio, (b) do aço inoxidável, (c) do aço perlítico.	22
Figura 13: tribometro CETR-UTM2.....	23
Figura 14 : modelo de vial utilizado para armazenar o óleo após o ensaio.	25
Figura 15: Ferrógrafo T2FM.....	26
Figura 16: esquema da montagem do sistema de preparação da lâmina e da membrana	26
Figura 17: imagens no início das lâminas das amostras de (a) Alumínio; (b) aço inoxidável; (c) aço perlítico	28
Figura 18: imagens binárias e com a máscara indicando as partículas contadas (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável; (c) do aço perlítico.	29
Figura 19: comparação das partículas da amostra de alumínio encontradas na (a) lâmina e (b) membrana	30
Figura 20: imagens das amostras em que as setas indicam a localização dos óxidos (a) aço inoxidável; (b) e (c) aço perlítico.....	31
Figura 21: pistas reconstruídas (a) alumínio; (b) aço inoxidável; (c) aço perlítico	32
Figura 22: imagens que mostram o fundo da pista e a borda (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável; (c) do aço perlítico	32
Figura 23: imagens das esferas com 2000x de aumento (a) sem desgaste; após ensaio (b) no alumínio; (c) no aço inoxidável; (c) no aço perlítico	33
Figura 24: Imagens de MEV (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável e (c) do aço perlítico.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: resumos das combinações experimentais	23
Tabela 2: Parâmetros de contato	24
Tabela 3: Resultados de interferometria	27
Tabela 4: Quantificação das partículas no ferrograma	29
Tabela 5: Resultados de EDS	34

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto do tema	11
1.2	Caracterização do problema.....	11
1.3	Objetivos	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1	Contexto da aplicação da ferrografia	12
2.2	Camada de óxido em metais	16
2.3	Geração de debris em ensaios laboratoriais	17
2.4	Quantificação do desgaste por interferometria	19
3	MATERIAIS E MÉTODOS	20
4	RESULTADOS.....	27
4.1	Análise interferometria	27
4.2	Análise de ferrografia.....	28
4.3	Análise microscópica das pistas de desgaste.....	31
5	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS.....	37
	APÊNDICE A – DADOS DO ÓLEO LUBRIFICANTE	40
	ANEXO A – RELATÓRIO DE INTERFEROMETRIA.....	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Tema

O estudo e quantificação do desgaste ao qual um sistema mecânico está submetido é de grande importância para diferentes aplicações. Seja na área industrial, em que interessam tanto os parâmetros de controle de qualidade de fabricação, quanto processos de acompanhamento e manutenção dos maquinários, ou no âmbito acadêmico em que o foco principal é estabelecer relações entre diferentes parâmetros, para melhor compreender as variáveis que exercem influência direta no desgaste de componentes.

A ferrografia analítica é uma técnica de análise de óleo lubrificante que é importante para o estudo do regime de desgaste de um sistema mecânico. É uma ferramenta para identificar partículas, cuja característica e quantidade relacionam-se diretamente com a severidade do desgaste ou a alguma falha que o componente pode vir a apresentar. Por isso é bastante utilizada na área de manutenção preditiva de máquinas, tornando o seu desenvolvimento bastante desejável à indústria.

Outra abordagem para o estudo do desgaste de um componente é através da análise de superfícies. Este enfoque engloba diferentes técnicas de caracterização, em que se avaliam diferentes aspectos que descrevem uma superfície, tornando viável a comparação da mesma superfície em diferentes períodos de operação, provendo assim informações sobre a evolução do desgaste através da observação das diferenças nos parâmetros iniciais e finais.

1.2 Caracterização do Problema

O estudo do desgaste de sistemas mecânicos é de grande relevância. Existem muitas formas de quantificar o desgaste, duas técnicas serão o centro do estudo: as metodologias de estudo do desgaste a partir da topografia das amostras e a que estuda através da ferrografia analítica que é a análise do óleo que navega pelo sistema.

A topografia das superfícies é muito importante para a funcionalidade dos componentes, e a ferrografia é uma das análises de manutenção preditiva que é capaz

de acompanhar a evolução do desgaste de um sistema, e contém informações significativas sobre o tipo e o nível de desgaste a que o sistema está submetido.

Sabe-se que a análise topográfica é bastante eficaz na quantificação do desgaste, porém não é aplicável ao dia a dia da manutenção em indústrias. A ferrografia por sua vez, é uma maneira de investigar as condições de operação de uma máquina sem a necessidade de paradas, porque precisa apenas de uma amostragem representativa de óleo do sistema.

Ambas as abordagens são muito bem exploradas separadamente, tanto a técnica de quantificação do desgaste através da análise topográfica quanto a ferrográfica. Mas é importante saber como essas técnicas se complementam, na verdade, saber se a ferrografia é tão eficaz quanto a topografia, quando aplicada a sistemas com condições variadas.

1.3 Objetivos

O presente trabalho tem o objetivo de explorar a técnica de ferrografia analítica, procurando aprofundar o conhecimento dela quanto à análise do desgaste em sistemas com materiais e níveis de oxidação diferentes.

Mais especificamente, estuda-se a técnica de análise e quantificação do desgaste na amostra por interferometria óptica, além de propor uma metodologia para ensaios de movimento recíproco (reciprocating) no tribometro.

Em suma, dispõe-se a:

- Estudar a confiabilidade da ferrografia analítica para a análise de desgaste em sistemas;
- Fazer uma comparação com a quantificação do desgaste medido pela interferometria óptica;

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Contexto da aplicação da ferrografia

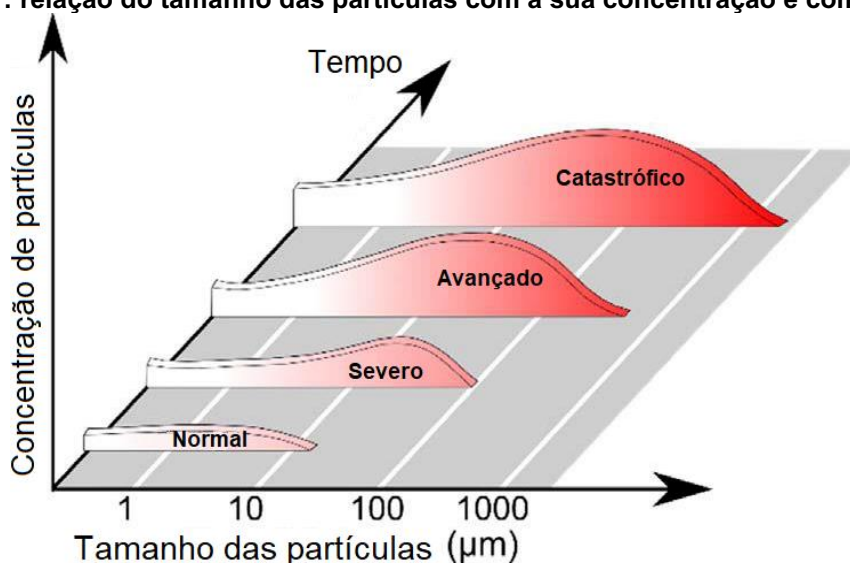
O principal foco de estudo da ferrografia analítica são partículas de desgaste que ficam em suspensão no óleo lubrificante. Esta técnica permite a identificação da

morfologia e do tamanho dessas partículas, e a partir dessas informações é possível realizar um estudo do regime de desgaste do componente mecânico em questão. (Tonggang et al., 2012)

Essa técnica que se tornou conhecida na década de 1970, foi uma grande inovação para o setor de manutenção industrial, uma vez que possibilitou o acompanhamento da situação do componente, sem a necessidade de parada e desmontagem, uma vez que é necessário apenas uma pequena amostragem de óleo que pode ser coletada do reservatório. (Maclán et al., 2006)

É importante conhecer sobre a condição de desgaste do componente para que se tomem as providências corretas em sua manutenção. Para tanto, uma análise cautelosa das partículas presentes no óleo lubrificante, observando a sua forma, tamanho, cor, espessura, contorno e textura, determina a condição das superfícies que estão em movimento e conseqüentemente a integridade do componente. (Cho & Tichy, 2000; Raadnui, 2005)

Figura 1: relação do tamanho das partículas com a sua concentração e com o tempo



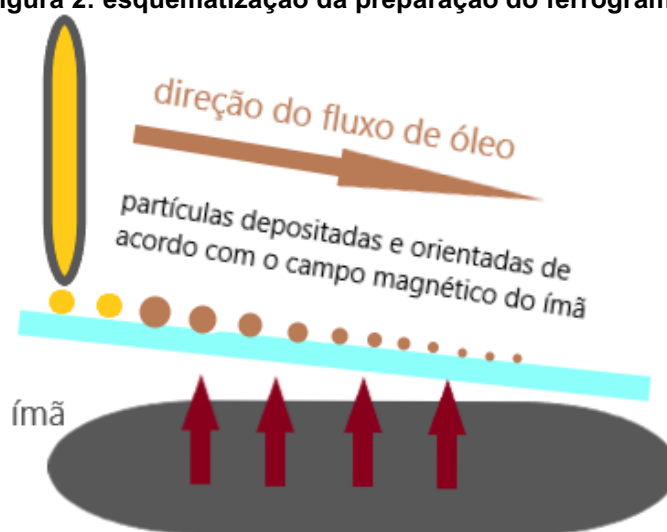
Fonte: Adaptado de Zhu et al., 2017

A relação do tamanho das partículas ao longo do tempo e a sua concentração em comparação com o grau de desgaste é ilustrada pela figura 1, acima. É importante ressaltar que o tamanho aceitável das partículas de desgaste que caracterizam um regime normal podem variar de acordo com o tipo e operação de cada máquina, mas que a relação geral apresentada se mantém. (Zhu et al., 2017)

Para que seja viável realizar a análise das partículas em questão, é necessário preparar amostras. Para tanto, separa-se uma parte do óleo lubrificante, adiciona-se

solvente para diluir o óleo facilitando que as partículas precipitem. Após isso a solução é gotejada sobre substrato transparente, que fica levemente inclinado para que a solução escorra. O substrato também fica posicionado sobre ímãs que retêm as partículas magnéticas, orientando-as, sendo a ordem das maiores para as menores. Ao final faz-se uma lavagem com solvente, para evitar qualquer resquício de óleo, a figura 2 ilustra a disposição do sistema. (Roylance, 2005)

Figura 2: esquematização da preparação do ferrograma.

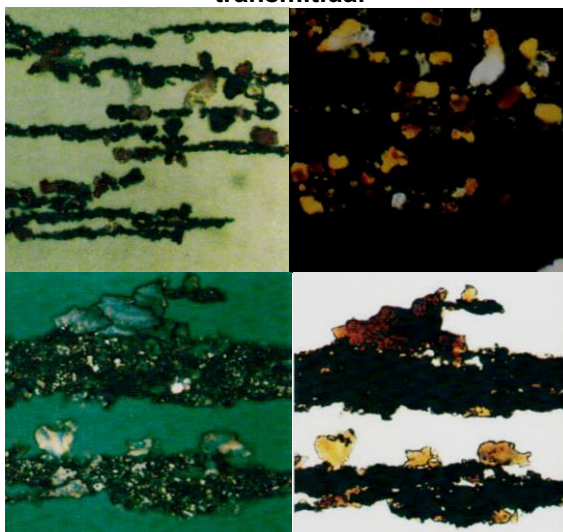


Fonte: Autoria própria.

Comumente chamado de ferrograma, esse substrato é uma lâmina de vidro com uma barreira química que impede que as partículas fiquem espalhadas por toda a superfície, mas sim que fiquem concentradas numa área determinada. Após a preparação, o ferrograma é analisado em microscópio óptico metalográfico onde é possível analisar partícula por partícula.

Os óxidos ferrosos encontrados nessa análise podem ser divididos em duas categorias: óxidos vermelhos e óxidos escuros. De acordo com o Atlas de ferrografia, os óxidos vermelhos aparecem alaranjados, quando se usa luz branca refletida, e quando a luz é polarizada aparece em um tom saturado de laranja. Há ainda um outro tipo de óxido vermelho que aparece cinza em luz refletida, porém quando se usa a luz transmitida, vê-se essas partículas com tons avermelhados. (Anderson, 1982)

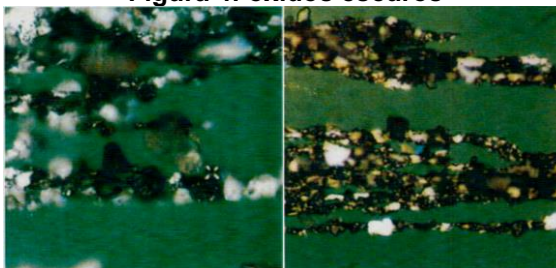
Figura 3: (a) óxidos vermelhos vistos em luz refletida;(b) mesma vis de (a) porém em luz polarizada; (c) outro tipo de óxido vermelho na luz refletida; (d) mesma vista de (c) em luz transmitida.



Fonte: (Anderson, 1982)

Quanto aos óxidos ferrosos escuros, estes aparecem de forma aglomerada, assim como os óxidos vermelhos, porém os óxidos escuros não são ferromagnéticos e podem estar presentes em qualquer região da lâmina. Uma das características que descrevem esse segundo tipo de óxidos é a presença de pontos alaranjados e azulados quando no limite inferior do foco. Não brilham com a luz polarizada pois absorvem bem a luz.(Anderson, 1982)

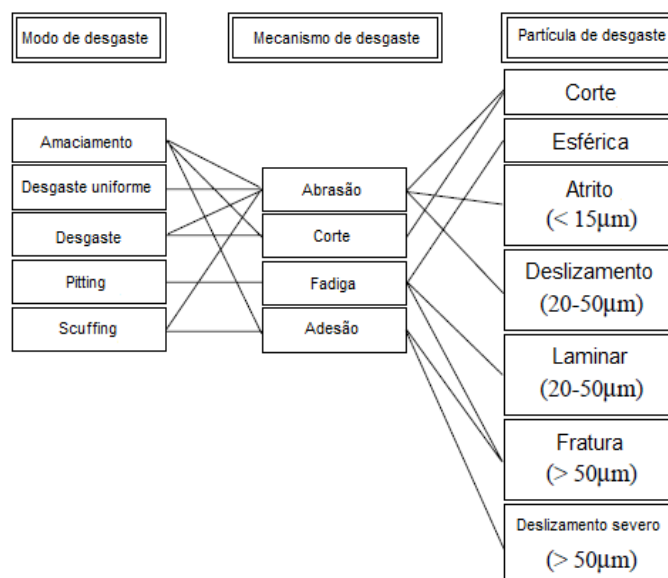
Figura 4: óxidos escuros



Fonte: (Anderson, 1982)

Outra maneira eficaz de realizar a análise das partículas no ferrograma é através do tratamento computacional das imagens obtidas no microscópio. Usando metodologias de segmentação de imagens, é possível criar um algoritmo de reconhecimento e classificação de partículas. Para tanto, informações das características como o tamanho, a forma, a textura da superfície, os detalhes de borda e a cor dos debris, são extraídas e relacionadas ao modo e ao mecanismo de desgaste.(Raadnui, 2005)

Figura 5:relação das características das partículas de desgaste com o modo e o mecanismo de formação.

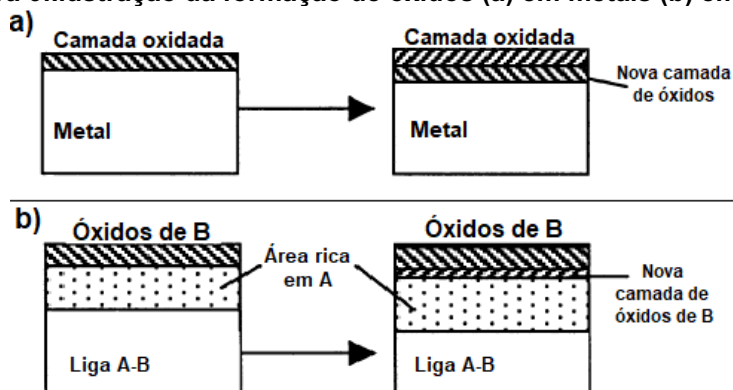


Fonte: Adaptado de (Raadnui, 2005)

2.2 Camada de óxido em metais

A formação de uma camada de óxido inicial em um substrato metálico faz com que haja uma difusão dos ânions do metal em direção a interface metal-óxido, fazendo com que uma nova camada de óxido se forme abaixo da que já existia. Há uma diferença quando se trata de uma liga, por exemplo se há uma liga formada por metais A e B, sendo que B é o que oxida, quando os ânions de B se difundirem para formar a nova camada, fará com que haja uma concentração maior de A em uma certa profundidade, Conforme ilustrado na figura 3. (Xu & Gao, 2000)

Figura 6:Ilustração da formação de óxidos (a) em metais (b) em ligas



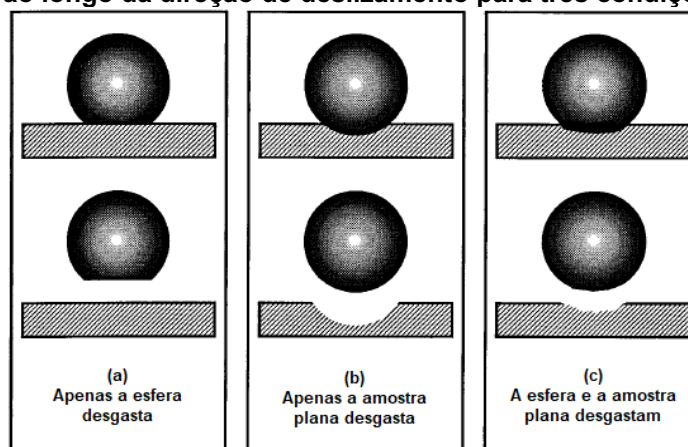
Fonte: adaptado de Xu & Gao, 2000

A partir da relação de Pilling-Bedworth é possível quantificar esses volumes, utilizando-se das massas molares e de outras constantes químicas, determinando uma relação entre o volume do óxido sobre o volume do metal. Essa relação não é tão direta para o caso de ligas, devido aos diferentes volumes de metais consumidos na formação da camada oxidada. (Xu & Gao, 2000)

2.3 Geração de debris em ensaios laboratoriais

No âmbito acadêmico, os mecanismos de desgaste de um motor podem ser reconstruídos a partir de ensaios de movimento recíproco, quando um corpo oscila com determinada frequência sobre outro corpo estático, onde parâmetros como frequência, carga normal, temperatura e distância percorrida são selecionados de forma que se aproximem às condições reais que pretendem serem replicadas. (Lee & Chittenden, 2010)

Figura 7: vista ao longo da direção de deslizamento para três condições de desgaste.



Fonte: Adaptado da norma ASTM G133

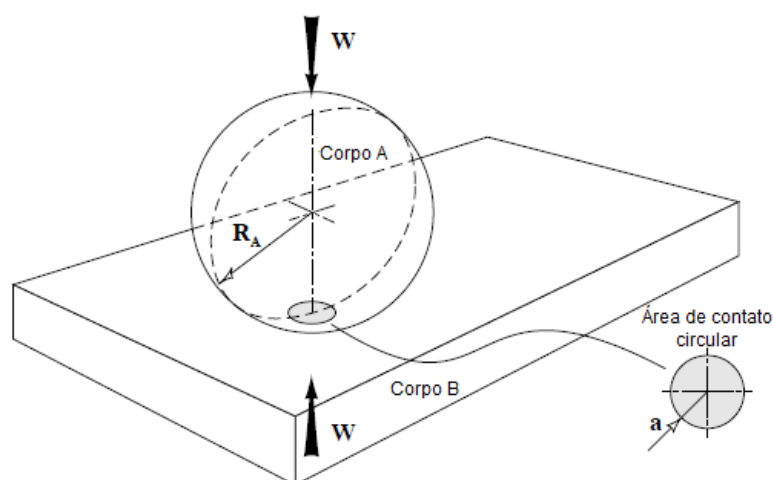
A norma ASTM G133 determina os passos que devem ser seguidos para a realização do ensaio esfera-plano, além de descrever a quantificação do desgaste, tanto na amostra quanto na esfera. A figura 7 ilustra três maneiras de interação entre corpo e contra corpo, as diferenças entre elas podem ser ocasionadas por causa de combinações de durezas diferentes entre os materiais da esfera e do plano.

Para que o ensaio seja eficiente, é necessário que os parâmetros envolvidos no processo sejam escolhidos de maneira a replicar mecanismos reais ou para

rastrear as forças envolvidas no ensaio. Por isso, é importante calcular a pressão de contato entre as superfícies e a profundidade de máxima tensão.

Esses parâmetros são controlados por variáveis como a carga aplicada, a geometria do contato e as propriedades mecânicas dos materiais, como o módulo de elasticidade e o coeficiente de Poisson. Para o caso estudado, o contato ocorre entre uma esfera e um plano, gerando uma área de contato circular. (G. W. Stachowiak & Batchelor, 2005)

Figura 8: contato entre esfera e plano



Fonte: Adaptado de (G. W. Stachowiak & Batchelor, 2005)

As equações necessárias para a solução do contato e o cálculo das forças geradas estão dispostos no quadro 1.

Quadro 1: equações para solução do contato

Módulo de Young reduzido (E')	$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[\frac{1 - \nu_A^2}{E_A} + \frac{1 - \nu_B^2}{E_B} \right]$ [1/Pa]
Raio de curvatura (R')	$\frac{1}{R'} = \frac{2}{R_A}$ [1/m]
Dimensão da área de contato (a)	$a = \left(\frac{3WR'}{E'} \right)^{1/3}$ [m]
Pressão máxima de contato (p_{max})	$p_{max} = \frac{3W}{2\pi a^2}$ [Pa]
Tensão máxima (τ_{max})	$\tau_{max} = \frac{1}{3} p_{max}$ [Pa]
Profundidade da tensão máxima (z)	$z = 0,638a$ [m]

Fonte: (G. W. Stachowiak & Batchelor, 2005)

Onde E_A e E_B são os módulos de elasticidade, ν_A e ν_B são os coeficientes de Poisson da esfera e da amostra, respectivamente, R_A é o raio da esfera e W é a carga aplicada no eixo vertical. É a partir desse ensaio que os produtos a serem analisados

serão produzidos neste trabalho em particular, tanto o óleo para a ferrografia quanto a amostra para quantificação do desgaste pela análise da superfície final.

2.4 Quantificação do desgaste por interferometria

A perfilometria é uma técnica muito utilizada quando é preciso determinar as características topográficas de uma dada superfície. Informações como ondulação, rugosidade e acabamento superficial são parâmetros essenciais de metrologia e são indicadores da qualidade de determinado processo. (Vangla & Latha, 2017)

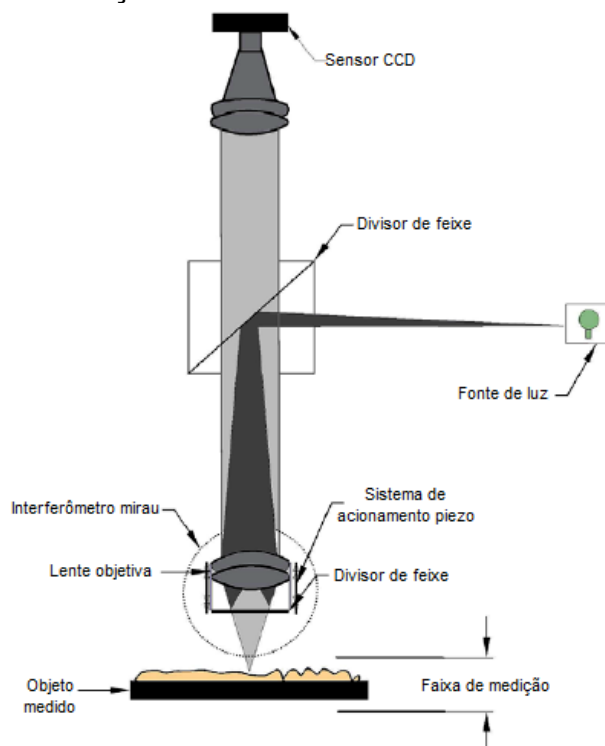
Para tal, existem duas formas principais de aquisição dessas informações, a perfilometria de contato e a técnica de interferometria de luz branca, sendo esta última uma escolha mais segura, pois o funcionamento da primeira depende que uma ponteira percorra a superfície, o que pode até gerar mudanças na rugosidade do material, uma vez que onde há contato há desgaste, e ainda que mínimo, em alguns casos pode gerar grande desvio. (Maniscalco et al., 2014)

Para evitar essa desvantagem, optou-se por utilizar outro método dentro do universo da interferometria de luz branca, que foi o CCI (coherence correlation interferometry). Essa possibilidade provê imagens rápidas e precisas da superfície, fazendo uma varredura e utilizando padrões de interferência da luz a partir de conjuntos de franjas. (Maniscalco et al., 2014)

Para fazer isso, são necessários dois feixes de luz que são provenientes da divisão de um feixe principal produzida por uma fonte, um dos feixes serve como referência e o outro incide sobre a amostra, o que é refletido por ela é comparado com o de referência, criando assim padrões de interferência, que são captados e processados por uma câmera digital de alta resolução, esse funcionamento é esquematizado na figura a seguir. (Maniscalco et al., 2014; Vangla & Latha, 2017)

A partir das imagens adquiridas nesse método, é possível avaliar a topografia da superfície, permitindo estudos sobre diversas categorias de parâmetros, sendo que os mais importantes para a análise da rugosidade são os relativos à amplitude, ao espaçamento e os híbridos, que são uma combinação dos dois. (Vangla & Latha, 2017)

Figura 9: esquematização do funcionamento de um interferômetro CCI.



Fonte: Adaptado de (Maniscalco et al., 2014)

Existem métodos capazes de quantificar o desgaste superficial a partir de análises dos parâmetros de rugosidade. Uma forma de realizar esse estudo é comparar os parâmetros da superfície antes e depois do desgaste, usando a superfície original como referência. (Fernandes, 2018)

Os parâmetros comumente utilizados para definir o desgaste não severo de sistemas são os da curva de Abbot, chamados S_k , S_{pk} e S_{vk} . São relativos à razão de material e referem-se a região central, aos picos e aos vales respectivamente. Para quantificar o desgaste a partir desses parâmetros, define-se o $S3k$, que é a soma dos três valores encontrados para cada condição antes e após o desgaste, sendo que quanto maior o $S3k$ maior é o desgaste. (Fernandes, 2018)

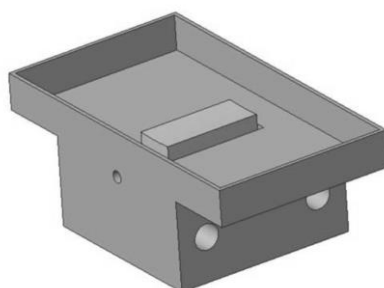
3 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta de trabalho é analisar como a técnica de ferrografia analítica responde quando as partículas de interesse do estudo são óxidos presentes nos óleos lubrificantes. Para tanto, foram realizados três ensaios do tipo reciprocating com geometria esfera-plano, usando três substratos diferentes, aço inoxidável 15-5 PH,

aço TR-68, usado na fabricação de trilhos ferroviários, e alumínio comercial anodizado, com contra corpo sendo uma esfera de aço 52100 temperado e revenido com 3 mm de diâmetro e um óleo lubrificante Petronas SAE CF-30.

O primeiro passo foi adequar os corpos de prova às dimensões condizentes ao recipiente em que serão realizados os ensaios lubrificados, as quais são 24mm de comprimento, por 10mm de espessura por 9mm de altura. O recipiente que será utilizado está ilustrado na figura abaixo:

Figura 10: cuba para os ensaios



Fonte: adaptado de (Fernandes, 2018)

Após devidamente cortadas, e planificadas, as amostras tiveram sua superfície caracterizada através da técnica de interferometria óptica, para que se conheçam as condições iniciais de rugosidade desses corpos de prova. Para tanto, foi utilizado o interferômetro da Taylor Hobson, modelo Talysurf CCI Lite M12-3993-03 como o da figura:

Figura 11: interferômetro CCI Taylor Hobson.



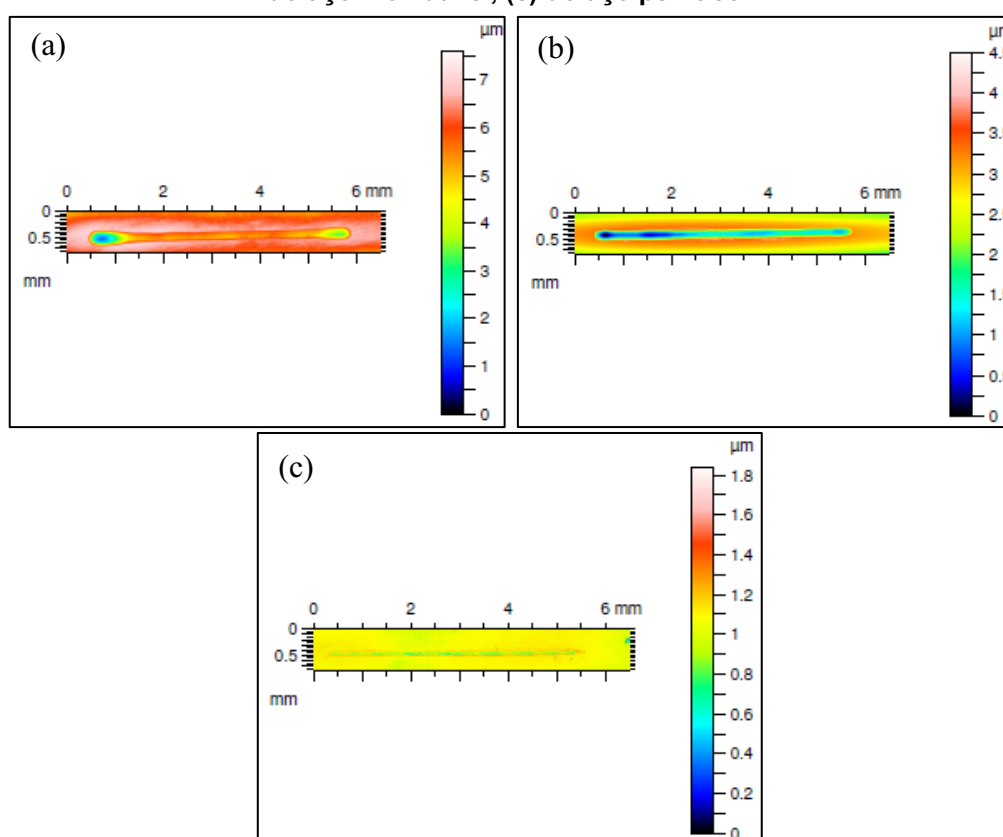
Fonte: Taylor Hobson Precision, 2008

As pistas de desgaste foram analisadas no interferômetro e as imagens foram tratadas no software TalySurf, onde são feitas correções de nivelamento, preenchimento de pontos não medidos, um documento de exemplo, onde são

mostrados outras etapas de tratamento encontra-se no Anexo a – relatório de interferometria.

Nas análises realizadas no interferômetro antes dos ensaios, tomou-se especial cuidado para que as imagens fossem obtidas aproximadamente na mesma região em que posteriormente estaria localizada a pista proveniente do ensaio no tribometro. A figura 10 mostra as pistas de desgaste medidas no interferômetro para cada material.

Figura 12: imagens de interferometria das pistas, após threshold (a) do alumínio, (b) do aço inoxidável, (c) do aço perlítico.



Fonte: autoria própria

Além disso, as superfícies desgastadas também foram analisadas no microscópio para caracterização das pistas de desgaste. Também foram realizadas imagens no microscópio eletrônico de varredura (MEV) da Zeiss, modelo EVO MA 15 que é equipado com um detector Oxford Instruments EDS X-Max de 20 mm^2 para microanálise química.

As condições iniciais do óleo lubrificante também foram aferidas através de duas técnicas: espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) e espectrometria no infravermelho por transformada de

Fourier (FTIR). As condições finais forma medidas pela mesma metodologia e os resultados encontram-se no APÊNDICE A – Dados do óleo lubrificante. Tais resultados das condições pré-ensaio das amostras, do óleo e das esferas são importantes para posterior comparação.

O segundo passo será a realização dos ensaios de desgaste. O sistema será montado e ensaiado num tribometro CETR-UTM2 conforme a imagem que segue:

Figura 13: tribometro CETR-UTM2.



Fonte: do Vale, 2016

As esferas utilizadas para todos os ensaios foram de aço 52100, temperado e revenido com dureza de 716 HV conforme (Rovani et al., 2021). A tabela 1 a seguir lista as propriedades mecânicas de cada material, sendo o módulo de elasticidade (E), o coeficiente de Poisson (ν) e a dureza Vickers (HV). Também cita as combinações experimentais que serão utilizadas e quais diferenças espera-se encontrar na condição final do óleo:

Tabela 1: resumos das propriedades mecânicas e combinações experimentais

Material ensaiado	Propriedades mecânicas	Carga normal (N)	Frequência (Hz)	Stroke (mm)	Temperatura do ensaio	Tempo de ensaio	Expectativa da geração de óxidos
Alumold 500	E=73 GPa $\nu=0,33$ 196 HV	2	10	5	Ambiente	2h	Alta
Aço inoxidável 15-5 PH	E=196 Gpa $\nu=0,27$ 402,1 HV	2	10	5	86°C	2h	Baixa
Aço TR-68	E=206Gpa $\nu=0,29$ 380 HV	2	5-15	5	86°C	4h	Média

Fonte: autoria própria

As combinações finais para cada ensaio foram definidas após a realização de testes iniciais e verificação de quais condições foram mais favoráveis para cada material. A variação de frequência para o aço perlítico TR-68 foi realizada com o intuito de gerar circunstâncias favoráveis para a ocorrência de desgaste oxidativo, a periodicidade com que ocorreu a mudança de frequência foi a cada 20 minutos.

O Alumold passou por um processo de anodização com solução de 5% de ácido sulfúrico (H_2SO_4) por 45 minutos a uma taxa de 15 mA/cm^2 , formando assim uma camada de óxidos na superfície do material.

A camada de óxido formada num aço inoxidável é mecanicamente estável, o que não ocorre num aço predominantemente perlítico (estimado pelo índice de Pilling-Bedworth). Esta camada é maior num alumínio anodizado, sendo que por conta de o substrato ser mais macio, espera-se um arrancamento maior neste caso. Com isso, simulam-se condições diferentes para que os níveis de debris metálicos sejam cada vez mais associados com partículas de óxidos, permitindo verificar qual é a interferência delas na qualidade da técnica ferrográfica.

A tabela 2 sumariza os resultados dos cálculos para o contato esfera-plano.

Tabela 2: Parâmetros de contato

Parâmetros	Alumond 500	Aço inoxidável	Aço perlítico
$P_{máx}$	691 MPa	1,04 GPa	1,06 GPa
τ	230 MPa	346 MPa	353 MPa
Z	0,0237 mm	0,0194 mm	0,0192 mm

Fonte: autoria própria

Para poder fazer uma comparação direta dos resultados de cada ensaio, mesmo tendo operado com tempos diferentes, os valores obtidos pelas análises subsequentes foram divididos pelo tempo de ensaio, obtendo-se assim uma taxa de desgaste, assim os resultados podem ser comparados, uma vez que se avalia a partir da unidade de hora.

Para evitar ao máximo a contaminação das amostras de óleo usadas nos ensaios, o procedimento adotado divide-se em duas partes: limpeza pré-ensaio e coleta da amostra pós-ensaio. A primeira parte, consiste na lavagem da cuba e do porta-esfera com solvente, optou-se pelo uso do hexano, e na ambientação da cuba, que é colocar uma pequena quantidade de óleo na cuba e agitar de forma que o óleo passe por toda a superfície e descartar esse óleo, isso é repetido por três vezes.

Para segunda parte foram usados vials de 20 ml devidamente higienizados e acondicionados para armazenar as amostras de óleo. Os recipientes foram devidamente identificados e tampados. Buscou-se escorrer completamente o óleo imediatamente após o fim do ensaio, para minimizar possíveis perdas e contaminação. Os corpos de prova foram colocados em embalagens plásticas tipo zip junto com a respectiva esfera.

Figura 14 : modelo de vial utilizado para armazenar o óleo após o ensaio.



Fonte: Imagem do site CQA química, acesso em 30/04/2022

Ao término de cada ensaio, o óleo foi devidamente ser recolhido e armazenado em um recipiente previamente limpo com algum solvente, como acetona ou heptano, para garantir que não houvesse contaminação da amostra de óleo por qualquer resíduo que pudesse estar presente no frasco. Os corpos de prova também foram devidamente acondicionados, para tanto, foram mantidos em óleo para evitar oxidação pós-ensaio, foram limpos imediatamente antes da análise em interferometria e voltaram para o óleo assim que terminada as análises.

O terceiro e último passo foi a realização das análises já propostas para as condições iniciais nos óleos e corpos de prova após o ensaio no tribometro, para fazer a comparação e estudo dos dados obtidos antes e depois, possibilitando a discussão dos resultados e as conclusões do estudo. O ferrógrafo utilizado para a preparação das lâminas será o T2FM 500 da Spectro Scientific, que serão posteriormente analisadas em um microscópio óptico metalográfico Olympus BX51M. A imagem a seguir mostra o ferrográfo:

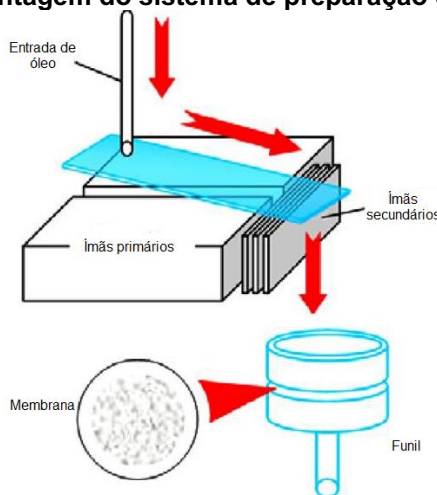
Figura 15: Ferrógrafo T2FM



Fonte: Imagem do site Pensalab, acesso em 30/04/2022.

No terceiro passo, propõe-se uma modificação na montagem do sistema de ferrografia analítica para reter mais partículas de óxido. No modelo convencional, o óleo é diluído em solvente e gotejado através de um substrato transparente, onde as partículas magnéticas ficam retidas, são direcionadas e separadas por tamanho, das maiores para as menores, as partículas que não são magnéticas ficam presas em barreiras formadas pelo campo orientado das que o são, o óleo corre sobre esse substrato e no final do curso é descartado.

Figura 16: esquema da montagem do sistema de preparação da lâmina e da membrana



Fonte: Adaptado de (Maclán et al., 2006)

Como a proposta do trabalho é justamente a análise dos óxidos, que não são magnéticos, propõe-se que ao final do curso do óleo sobre o substrato monte-se um sistema de filtração com uma membrana com permeabilidade de 22 micrometros para que partículas que talvez não fossem depositadas sobre a lâmina sejam capturadas pela membrana e analisadas em microscópio óptico tais como as lâminas. O sistema é baseado no trabalho de (Maclán et al., 2006), a única diferença será a ausência dos ímãs secundários, que para este estudo não são necessários.

As imagens das lâminas obtidas no microscópio foram processadas no software ImageJ para quantificação em porcentagem da área ocupada pelas partículas. Para isso, as imagens foram transformadas em binárias, e então configuradas as medições a serem feitas e utilizando a ferramenta “*analyze particles*” do software.

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos em cada etapa proposta na metodologia. Para melhor compreensão dos dados analisados, serão utilizadas tabelas, gráficos e imagens, de forma a ilustrar e sumarizar os resultados.

4.1 Análise interferometria

As imagens foram obtidas conforme especificado anteriormente, utilizando a função de varredura. A tabela 3 apresentada abaixo mostra as médias dos parâmetros encontrados a partir da medição das três pistas de cada condição ensaiada.

Tabela 3: Resultados de interferometria

Amostra	Período	S_k	S_{pk}	S_{vk}	$S_{k_{abs}}$	$S_{pk_{abs}}$	$S_{vk_{abs}}$	S_{3k}	S_{3k}/h
Alumínio	Antes	2,46	0,82	1,67	0,86	0,63	-0,34	1,16	0,58
	Depois	1,59	0,19	2,01					
Aço inoxidável	Antes	0,11	0,03	0,05	-0,52	-0,43	-0,94	-1,89	-0,94
	Depois	0,63	0,46	0,99					
Aço perlítico	Antes	0,18	0,05	0,10	0,12	-0,09	-0,06	-0,03	-0,01
	Depois	0,07	0,14	0,16					

Fonte: autoria própria.

Os valores $S_{k_{abs}}$, $S_{pk_{abs}}$ e $S_{vk_{abs}}$ são calculados fazendo-se a diferença entre as somas dos parâmetros antes e depois dos ensaios. O S_{3k} é a soma das diferenças e representa a diferença de volume de material entre as condições iniciais e finais, esse valor foi dividido pelas horas de ensaio de cada condição para comparação das taxas de desgaste.

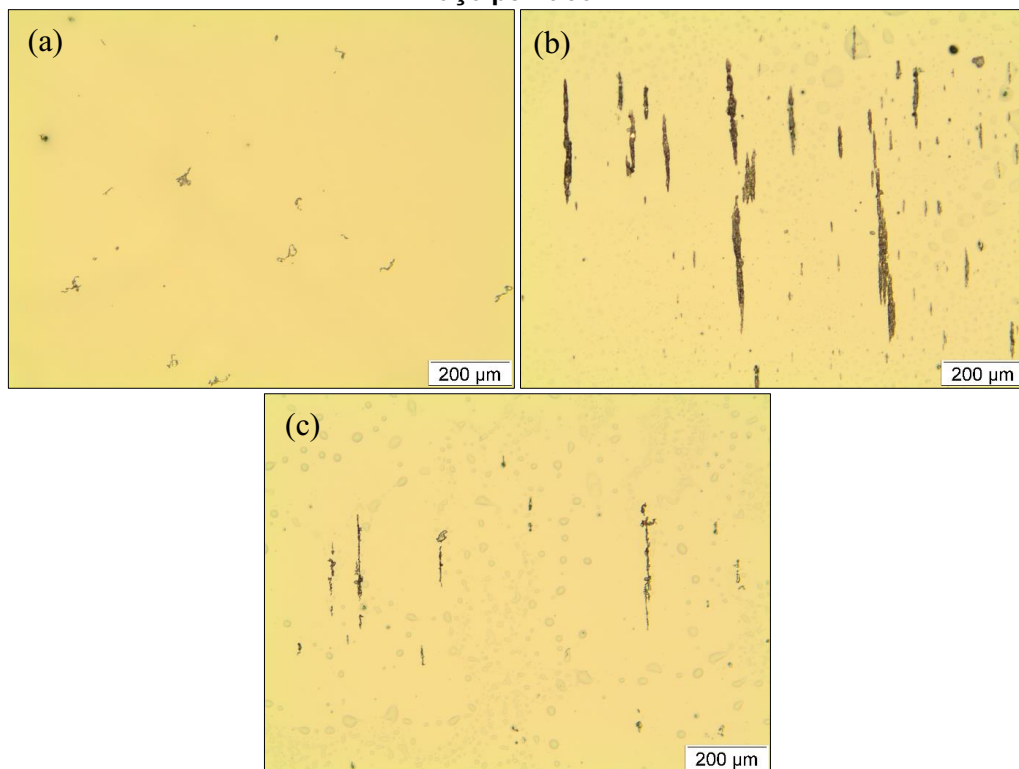
Nota-se na mesma tabela que a variação do volume de material foi pequena para o Alumínio, indicando pouco desgaste da amostra. Já para as outras duas

condições ensaiadas, os valores de S_{3k}/h calculados são negativos, indicando que o volume de material para a condição ensaiada da amostra foi maior que o volume para a condição não ensaiada. Pode-se entender que houve um acúmulo de material na pista de desgaste, que será investigado mais à frente.

4.2 Análise de ferrografia

As lâminas para análise ferrográfica foram preparadas em duplicata, portanto, foram analisadas 18 lâminas. Das análises feitas no microscópio foi possível observar que é na entrada da lâmina onde se concentram a maioria das partículas de desgaste.

Figura 17: imagens no início das lâminas das amostras de (a) Alumínio; (b) aço inoxidável; (c) aço perlítico

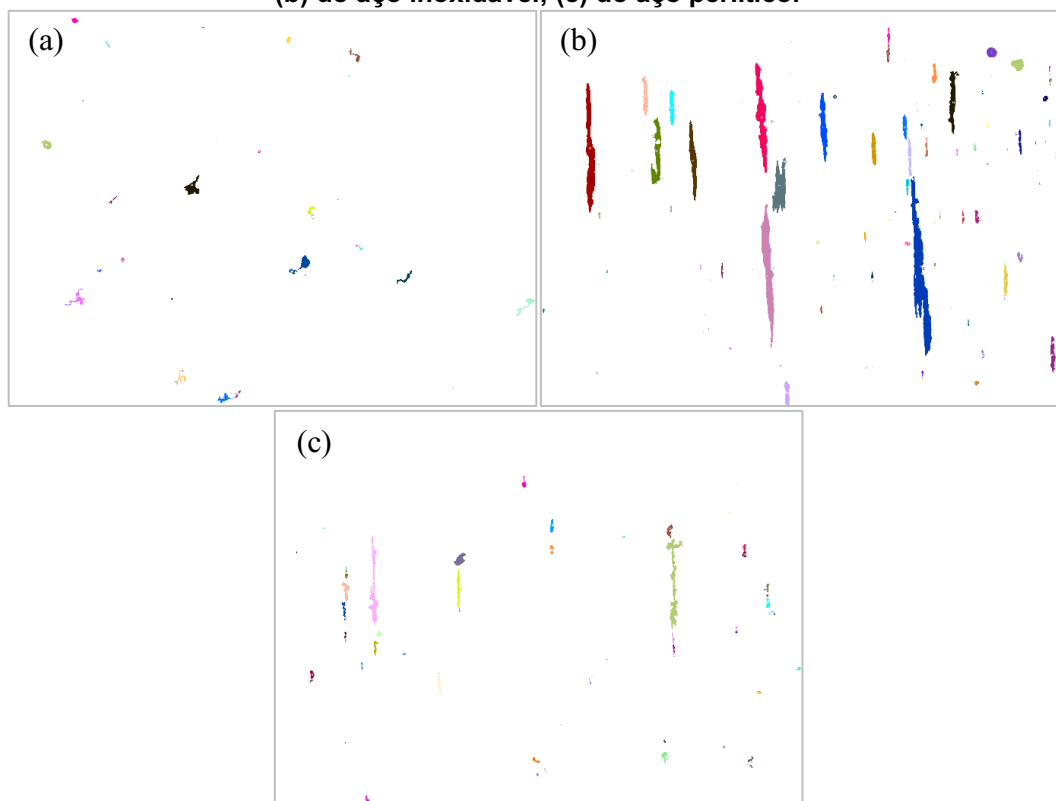


Fonte: autoria própria

A amostra que apresentou maior quantidade de partículas foi a do óleo usado no ensaio do aço inoxidável. As imagens feitas em distâncias similares e com a mesma ampliação para as três condições são comparadas na figura 17. Nota-se que para o óleo usado nos ensaios com alumínio não há formação de strings, que são os aglomerados de partículas magnéticas dispostos na vertical. Para a realização da

contagem de partículas, as imagens foram transformadas em binárias, as imagens a seguir mostram a máscara aplicada pelo software para a realizar a contagem:

Figura 18: imagens binárias e com a máscara indicando as partículas contadas (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável; (c) do aço perlítico.



Fonte: autoria própria

Para realizar a quantificação foram analisadas três imagens por amostra, com ampliações iguais de 100 vezes. Além da porcentagem média da área ocupada pelas partículas de cada condição, a tabela 4 mostra ainda quantidade de partículas em cada imagem utilizada.

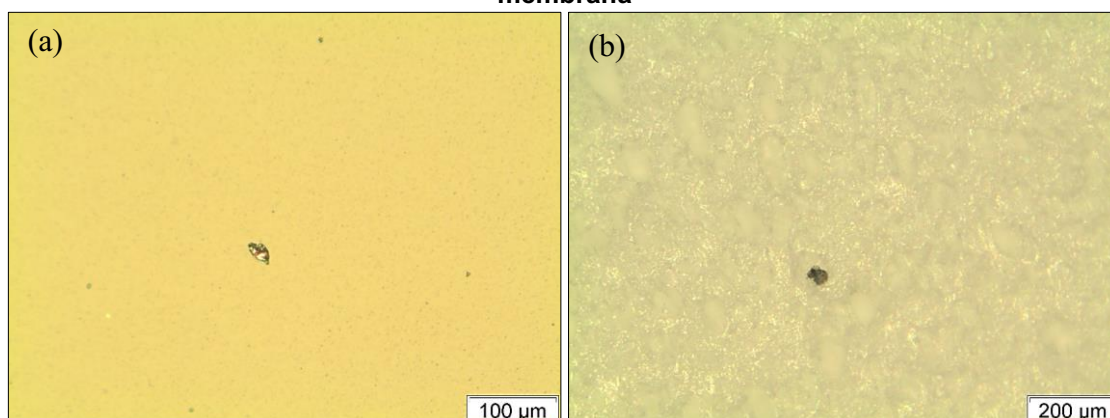
Tabela 4: quantificação das partículas no ferrograma

Amostra	Contagem	%Area	%Média	%Média/h
Alumínio	81	0,47	0,61	0,30
	43	0,40		
	125	0,95		
Aço inoxidável	145	6,30	6,08	3,04
	141	7,96		
	156	3,98		
Aço perlítico	55	0,89	0,89	0,22
	74	0,82		
	44	0,97		

Fonte: autoria própria

A adição da membrana na montagem da preparação da lâmina, conforme proposto na metodologia, mostrou-se mais aplicável ao alumínio, uma vez que este apresentou mais partículas retidas na membrana, enquanto as outras condições apresentaram mais contaminantes e fibras. É possível observar na imagem 19 que as partículas encontradas na lâmina das amostras de alumínio são parecidas com as encontradas nas membranas.

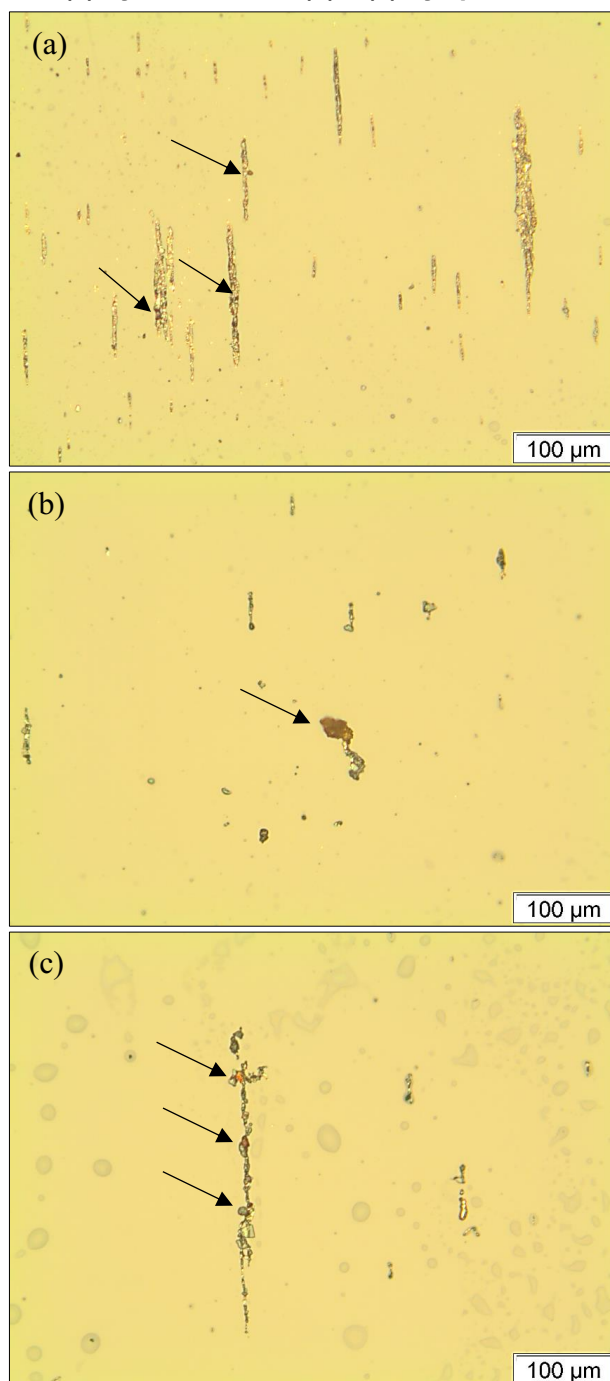
Figura 19: comparação das partículas da amostra de alumínio encontradas na (a) lâmina e (b) membrana



Fonte: autoria própria

Quanto a presença de óxido no sistema, nas amostras relativas ao aço perlítico TR-68, é possível identificar com mais frequência e clareza a presença de óxidos vermelhos. Também é possível encontrar esse tipo de partícula na amostra de aço inoxidável, provavelmente devido ao desgaste da esfera, entretanto, são partículas menores, e menos frequentes.

Figura 20: imagens das amostras em que as setas indicam a localização dos óxidos
(a) aço inoxidável; (b) e (c) aço perlítico



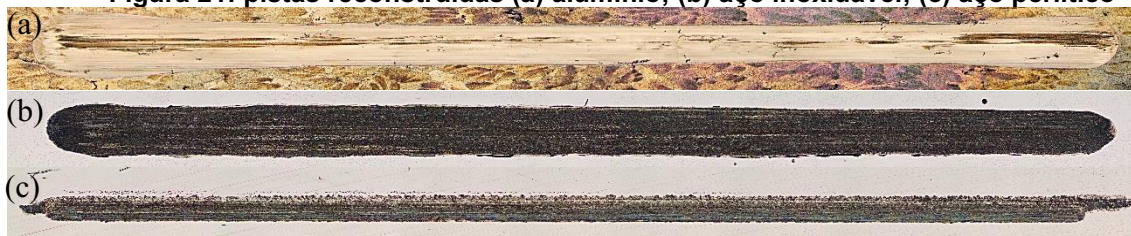
Fonte: autoria própria

4.3 Análise microscópica das pistas de desgaste

Por fim, foram geradas imagens de microscópio das pistas para investigação e caracterização do desgaste. Imagens foram adquiridas em sequência ao longo da pista com um aumento de 100 vezes e remontadas no software ImageJ usando a

ferramenta “*stitching*”, tornando possível a visualização da pista completa. Observando a figura 20, é visível a diferença entre as pistas, principalmente no tocante a largura e aos níveis de oxidação.

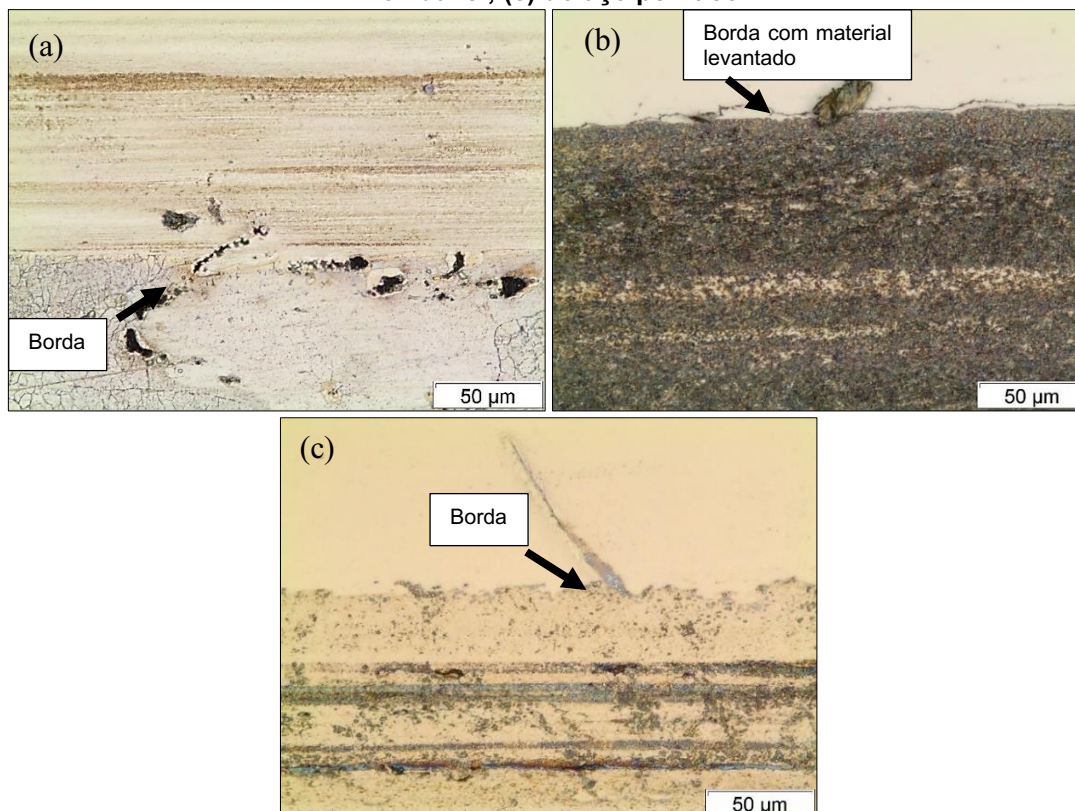
Figura 21: pistas reconstruídas (a) alumínio; (b) aço inoxidável; (c) aço perlítico



Fonte: autoria própria

Imagens mais aproximadas mostram distinções nas bordas de cada condição ensaiada. O alumínio apresenta uma borda regular e sem deformação de material para cima, oposto do que é observado para o aço inoxidável, em que se nota a presença significativa de material deformado. Na figura 21 ainda é visível que a borda da pista no aço perlítico é irregular e a camada oxidada parece menos densa que a observada no aço inoxidável.

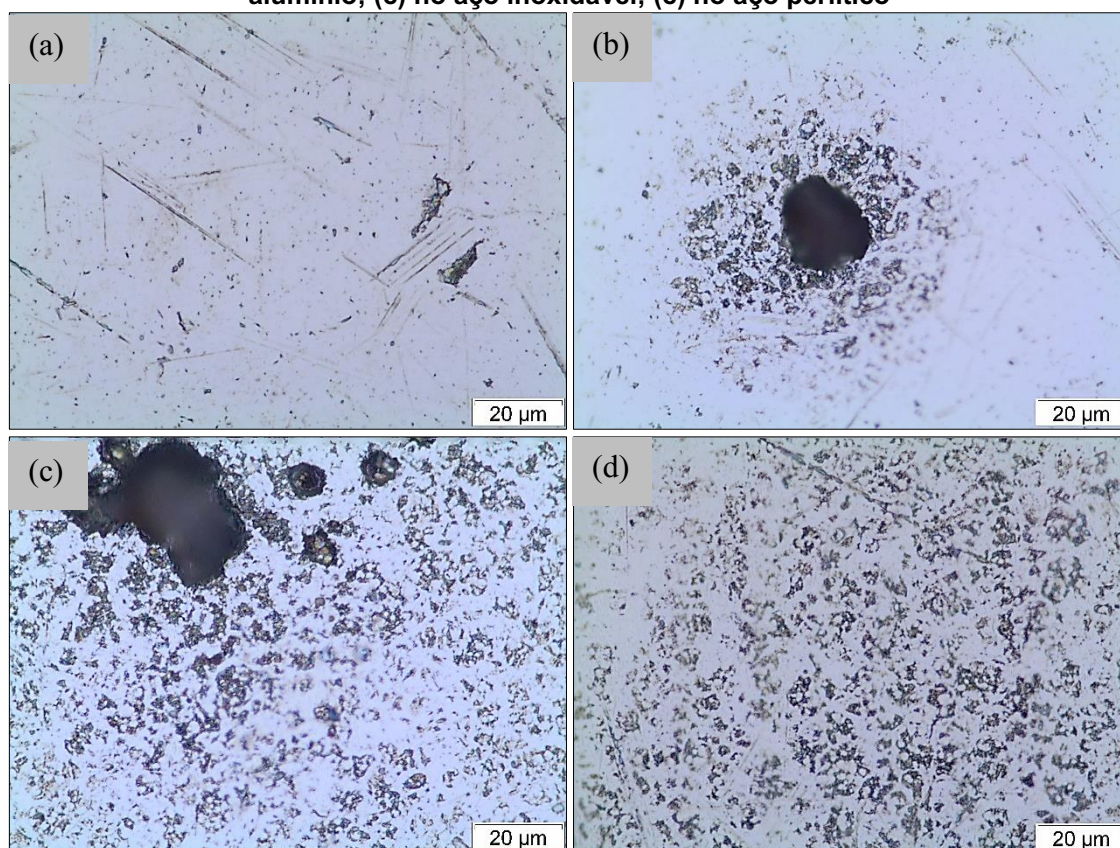
Figura 22: imagens que mostram o fundo da pista e a borda (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável; (c) do aço perlítico



Fonte: autoria própria.

Imagens obtidas das esferas mostram a superfície antes e depois dos ensaios de desgaste e são apresentadas na figura 24. Na região que ficou em contato com a amostra é possível observar um mesmo padrão na superfície das esferas para os três materiais. Como as imagens foram tiradas na mesma ampliação de 2000 vezes, ainda é possível observar que para a par com o alumínio a área afetada é menor que para os outros dois materiais. Também é possível observar a ocorrência de crateras, possivelmente formadas pelo arrancamento de material da esfera durante o processo de desgaste.

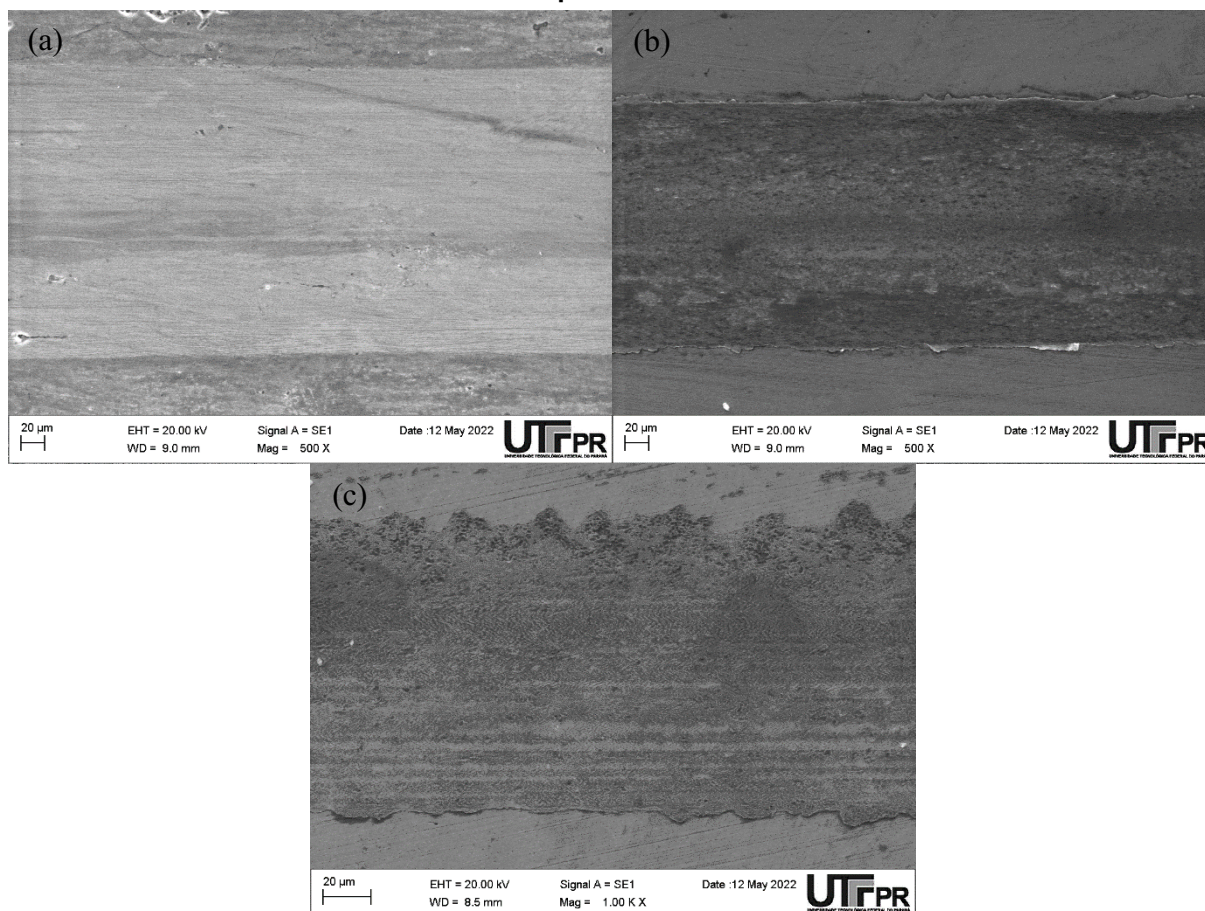
Figura 23: imagens das esferas com 2000x de aumento (a) sem desgaste; após ensaio (b) no alumínio; (c) no aço inoxidável; (c) no aço perlítico



Fonte: autoria própria

Por último, as amostras foram analisadas no MEV para realização de EDS com o intuito de identificar os elementos químicos presentes em regiões de interesse e a sua concentração em porcentagem de massa. Os resultados encontrados para as amostras foram comparados com a espectrometria realizada no óleo lubrificante, os dados referentes ao óleo lubrificante estão dispostos no Apêndice A.

Figura 24: Imagens de MEV (a) do alumínio; (b) do aço inoxidável e (c) do aço perlítico.



Fonte: autoria própria

A tabela 5 mostra a média dos valores encontrados para cada condição antes e depois os ensaios no tribometro. Os elementos de interesse são o ferro e alumínio sendo as principais composições dos materiais e o oxigênio que indica a ocorrência oxidação na região.

Tabela 5: Resultados de EDS

Material	Condição	O	Fe	Al	Somatório	Varição
Alumínio	Antes	4,90	0	77,57	82,46	6,94
	Depois	10,82	9,47	55,25	75,53	
Aço inoxidável	Antes	0	72,88	0	72,88	3,71
	Depois	9,26	59,90	0	69,16	
Aço perlítico	Antes	0	94,02	0	94,02	5,48
	Depois	7,00	81,54	0	88,53	

Fonte: autoria própria

A variação na somatória dos elementos químicos serve como comparação entre as condições iniciais e finais das superfícies. Pode ser interpretada como um

indicativo do comportamento do desgaste das amostras, isto significa que a presença de certos elementos na pista de desgaste são demonstrativos de perda ou deposição de material.

Portanto, com base nessa afirmação e na observação dos resultados obtidos no EDS das amostras, é possível interpretar que no caso do alumínio, que apresentou a maior variação entre as condições iniciais e finais. Observa-se que a porcentagem de alumínio diminui após o desgaste, a de oxigênio aumenta e há o aparecimento de ferro, por isso é possível afirmar que há certa deposição de material da esfera, entretanto, também houve arrancamento significativo de material. Essa afirmação é corroborada pelo resultado da interferometria, já que o cálculo do parâmetro S_{3k} mostra que o volume de material é menor na condição desgastada.

Já para o aço inoxidável, é evidente que houve oxidação após os ensaios, e isso é indicativo de deposição de material da esfera, uma vez que as condições necessárias para ativação da camada passiva que protege o aço da oxidação não foram atingidas. Além disso, o cálculo do S_{3k} resultou em um número negativo, significando que há mais volume de material depois do ensaio do que antes, mesmo que a contagem de partículas da ferrografia indique maior desgaste para essa condição. Por isso, pode-se inferir que o desgaste da esfera fez com que houvesse mais deposição de material do que arrancamento, e isso foi detectado pela ferrografia analítica.

Uma análise semelhante a feita para o aço inoxidável pode ser feita para o perlítico. Porém, por causa da diferença no resultado de ferrografia, não se pode afirmar que a esfera tenha desgastado mais do que a amostra, os resultados são bastante equilibrados e observando a diferença na largura da pista é indicativo de um equilíbrio no desgaste das superfícies.

5 CONCLUSÃO

Em suma, os resultados obtidos a partir da interferometria das amostras indicaram um maior desgaste para a condição de ensaio do alumínio, além de mostrar um comportamento anômalo para as amostras de aço, uma vez que demonstraram um volume maior de material depois dos ensaios do que na condição inicial.

Enquanto isso, a contagem de partículas por área feita a partir da ferrografia das amostras, apontou um maior desgaste para a amostra de aço inoxidável. Também demonstrou que o alumínio foi a condição com menos partículas retidas na lâmina, e que o aço perlítico foi o que mais apresentou partículas oxidadas depositadas na lâmina.

Quanto à análise microscópica das pistas de desgaste, foi possível observar que a variação dos materiais antes e após os ensaios, apesar de terem o comportamento esperado, foram muito pequenas para os aços, especialmente para o inox.

Em vista dos resultados que parecem contraditórios, é possível concluir que a contagem mais alta de partículas na ferrografia analítica, para a condição do aço inoxidável, na verdade aponta para um desgaste maior da esfera. Tal constatação é validada pelos resultados de interferometria e EDS que apontam um acúmulo de material na pista, além da presença de óxidos, que podem ser oriundos da esfera.

Fenômeno semelhante ocorre para o aço perlítico, porém em menor intensidade, haja visto o estreitamento da pista em relação ao aço inoxidável e a maior variação do volume na avaliação do EDS. Entretanto, a expectativa da formação de óxidos se cumpriu, e foi possível observar mais partículas oxidadas nessa condição do que nas outras.

Já o par esfera-alumínio foi o único que gerou maior desgaste na amostra, ainda que algum material da esfera tenha ficado aderido, como mostra o resultado de EDS. Por tal razão, é que na ferrografia analítica a quantidade de partículas retidas na lâmina foi menor, provando que há dificuldade de aplicação dessa técnica em sistemas em que o material não é ferromagnético. Além disso, foi o único par em que a proposta de coletar partículas na membrana no fim do curso de preparação da lâmina foi proveitosa, uma vez que reteve partículas de interesse para o estudo.

Assim, conclui-se que a ferrografia analítica depende grandemente da interação do par tribológico e não de componentes individuais. O estudo mostrou que levando em conta apenas os corpos de prova, o maior desgaste foi para o alumínio. Entretanto, avaliando-se o par, o maior desgaste foi para o aço inoxidável e a esfera, sendo que o contra corpo sofreu maior desgaste.

É possível relacionar os resultados da seguinte forma:

1. Para um par em que um corpo é mais duro do que o outro, a análise da superfície com a menor dureza, que é o caso do alumínio, aponta

diretamente para a perda de material, e a ferrografia não é conclusiva, uma vez que para esse estudo, as partículas em maior presença não eram ferromagnéticas;

2. Porém quando se observa a superfície com maior dureza, como no caso do aço inoxidável, é importante observar indícios de deposição de material, e como para esse cenário as partículas em maior quantidade no óleo eram ferromagnéticas, a ferrografia aponta um desgaste significativo, embora não aponte qual das superfícies é a mais desgastada;
3. Também se conclui que, em um par em que as propriedades mecânicas são semelhantes, como o caso do aço perlítico, há equilíbrio entre os resultados e há uma maior indefinição quanto a superfície que apresentou maior desgaste.

REFERÊNCIAS

Anderson, D. P. (1982). *Wear Particle Atlas*.

ASTM G133. (n.d.).

Belmondo, A., Giuggioli, F., & Giorgi, B. (1983). OPTIMIZATION OF F~RROGR~HIC OIL ANALYSIS FOR DIESEL ENGINE WEAR MONITORING*. In *Wear*.

Beltowski, M., Blau, P. J., & Qu, J. (2009). Wear of spheroidal graphite cast irons for tractor drive train components. *Wear*, 267(9–10), 1752–1756. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2009.03.030>

Cho, U., & Tichy, J. A. (2000). Quantitative correlation of wear debris morphology: grouping and classification. In *Tribology International* (Vol. 33). www.elsevier.com/locate/triboint

Cui, X. H., Wang, S. Q., Wang, F., & Chen, K. M. (2008). Research on oxidation wear mechanism of the cast steels. *Wear*, 265(3–4), 468–476. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.11.015>

do Vale, J. L. (2016). *Influência da microestrutura de ferros fundidos na ocorrência de metal dobrado e no comportamento tribológico de superfícies brunidas*. 270.

Fernandes, W. H. de C. (2018). *AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO SISTEMA ANEL-CAMISA UTILIZANDO AVALIAÇÃO TRIBOLÓGICA DO SISTEMA ANEL-CAMISA UTILIZANDO*.

Kucharski, S., & Mrz, Z. (2011). Identification of wear process parameters in reciprocating ball-on-disc tests. *Tribology International*, 44(2), 154–164. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2010.10.010>

- Kumar, M., Shankar Mukherjee, P., & Mohan Misra, N. (2013). Advancement and current status of wear debris analysis for machine condition monitoring: a review. *Industrial Lubrication and Tribology*, 65(1), 3–11. <https://doi.org/10.1108/00368791311292756>
- Lee, P. M., & Chittenden, R. J. (2010). Consideration of test parameters in reciprocating tribometers used to replicate ring-on-liner contact. *Tribology Letters*, 39(1), 81–89. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9590-8>
- Maclán, V., Payri, R., Tormos, B., & Montoro, L. (2006). Applying analytical ferrography as a technique to detect failures in Diesel engine fuel injection systems. *Wear*, 260(4–5), 562–566. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2005.03.019>
- Maniscalco, B., Kaminski, P. M., & Walls, J. M. (2014). Thin film thickness measurements using Scanning White Light Interferometry. *Thin Solid Films*, 550, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.10.005>
- Pocock, G., & Courtney, S. J. (1981). SOME QUANTITATIVE ASPECTS OF FERROGRAPHY. In *Wear* (Vol. 67). Elsevier Sequoia S.A.
- Raadnui, S. (2005). Wear particle analysis - Utilization of quantitative computer image analysis: A review. *Tribology International*, 38(10), 871–878. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.013>
- Rovani, A. C., Rosso, T. A., & Pintaude, G. (2021). On the use of microscale abrasion test for determining the particle abrasivity. *Journal of Testing and Evaluation*, 49(1), 550–561. <https://doi.org/10.1520/JTE20180576>
- Roylance, B. J. (2005). Ferrography - Then and now. *Tribology International*, 38(10), 857–862. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.006>
- Scott, D., & Westcott, V. C. (1977). PREDICTIVE MAINTENANCE BY FERROGRAPHY*. In *Wear* (Vol. 44). Elsevier Sequoia S.A.
- Stachowiak, G. P., Stachowiak, G. W., & Podsiadlo, P. (2008a). Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features. *Tribology International*, 41(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.04.004>
- Stachowiak, G. P., Stachowiak, G. W., & Podsiadlo, P. (2008b). Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features. *Tribology International*, 41(1), 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2007.04.004>
- Stachowiak, G. W., & Batchelor, A. W. (2005). Engineering Tribology. *Elsevier Butterworth-Heinemann*, 91, 399–404.
- Tonggang, L., Jian, W., Xiaohang, T., & Zhiyi, Y. (2012). Qualitative ferrographic analysis method by quantitative parameters of wear debris characteristics. *Industrial Lubrication and Tribology*, 64(6), 367–375. <https://doi.org/10.1108/00368791211262507>
- Vangla, P., & Latha, G. M. (2017). Surface topographical analysis of geomembranes and sands using a 3D optical profilometer. *Geosynthetics International*, 24(2), 151–166. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00023>

Williams, J. A. (2005). Wear and wear particles - Some fundamentals. *Tribology International*, 38(10), 863–870. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2005.03.007>

Xu, C., & Gao, W. (2000). Pilling-bedworth ratio for oxidation of alloys. *Materials Research Innovations*, 3(4), 231–235. <https://doi.org/10.1007/s100190050008>

Yuan, C. Q., Peng, Z., Zhou, X. C., & Yan, X. P. (2004). Effects of temperature on sliding wear process under contaminated lubricant test conditions. *Wear*, 257(7–8), 812–822. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.05.014>

Zhu, X., Zhong, C., & Zhe, J. (2017). Lubricating oil conditioning sensors for online machine health monitoring – A review. In *Tribology International* (Vol. 109, pp. 473–484). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2017.01.015>

APÊNDICE A – DADOS DO ÓLEO LUBRIFICANTE

Para a caracterização do óleo lubrificante foram aplicadas duas técnicas de espectrometria: espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente (ICP-AES) e espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados estão dispostos nas tabelas abaixo.

Tabela A1: Resultados ICP-AES

Elem. [ppm]	Óleo novo	Al 1	Al 2	Al 3	15-5 1	15-5 2	15-5 3	TR-68 1	TR-68 2	TR-68 3
Ag	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Al	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Cu	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
Fe	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
Mn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Sn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ti	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
V	3	13	13	14	14	14	14	21	15	14
B	10	19	19	19	19	18	18	29	18	18
Ba	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ca	26	30	31	32	36	32	32	46	34	34
Cd	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mg	703	1295	1298	1321	1310	1204	1330	1999	1356	1278
Mo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P	0	375	366	381	379	363	360	581	386	358
Zn	195	393	414	418	399	369	394	644	422	399
Na	0	6	6	6	5	8	2	2	5	5
Si	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

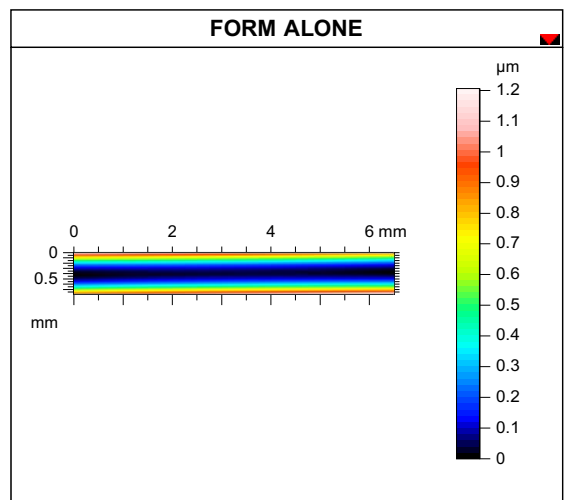
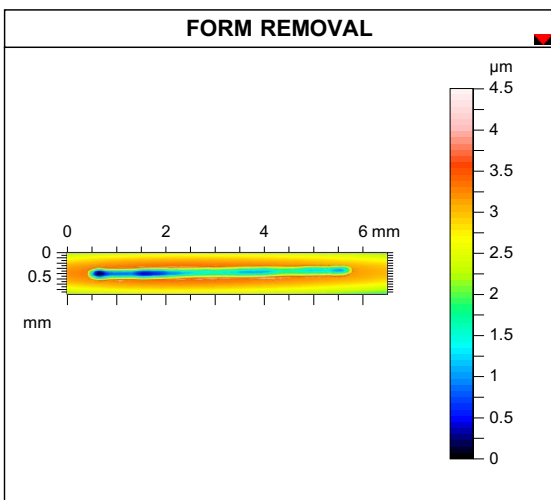
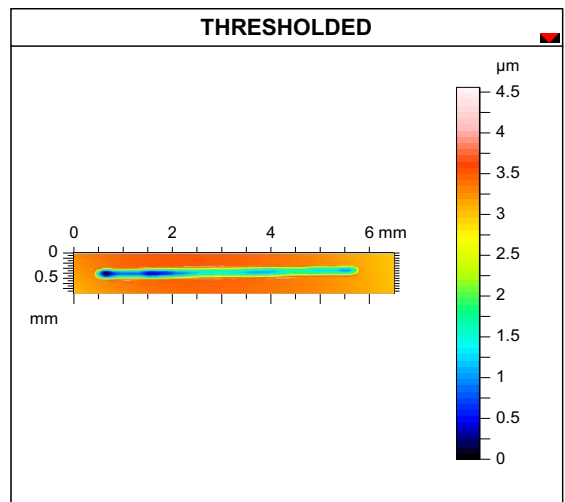
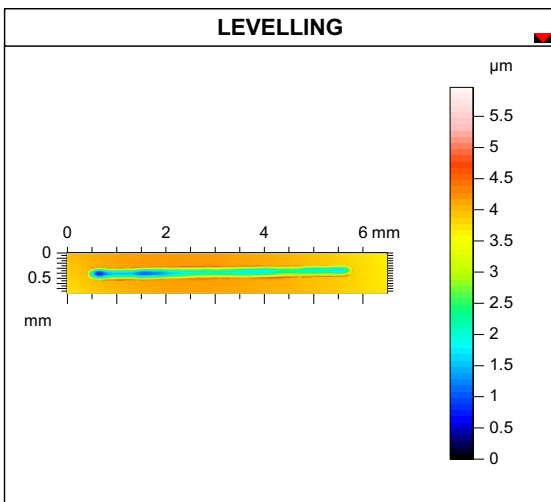
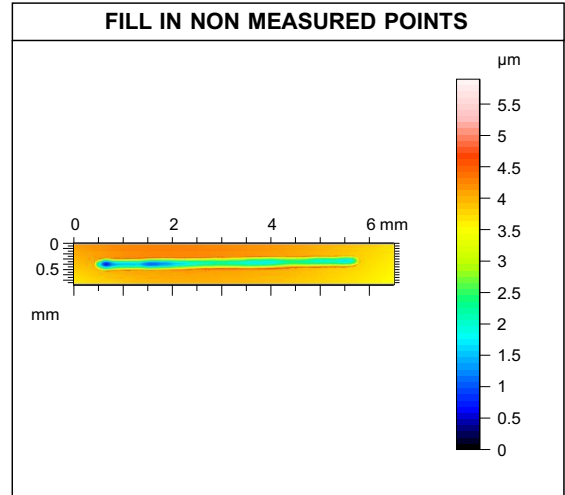
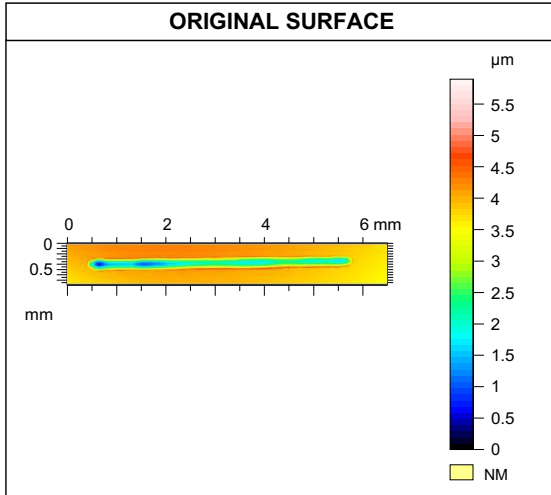
Fonte: Autoria própria.

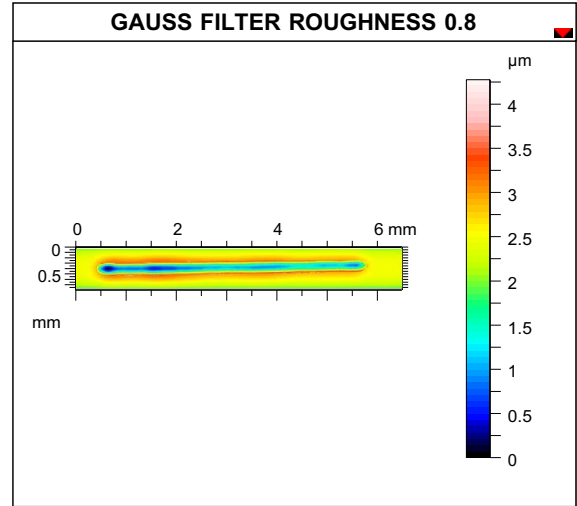
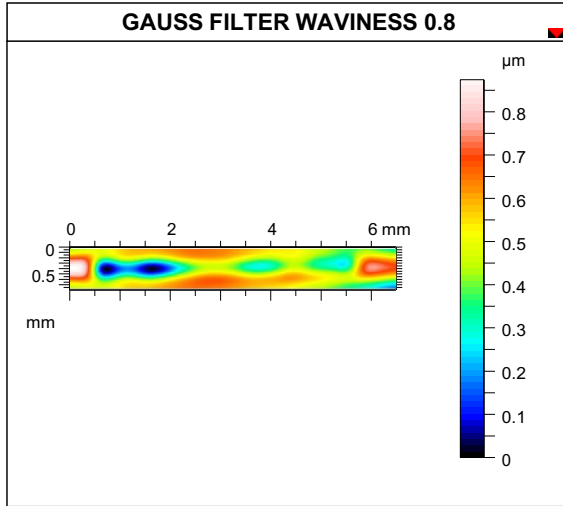
Tabela A2: Resultados de FTIR

	Óleo novo	Al 1	Al 2	Al 3	15-5 1	15-5 2	15-5 3	TR-68 1	TR-68 2	TR-68 3
Fuligem	0,10	0,15	0,17	0,16	0,11	0,09	0,12	0,12	0,11	0,11
Oxidação	3,53	3,55	3,33	3,30	3,60	3,74	3,60	3,40	3,50	3,53
Nitração	6,70	6,43	6,31	6,35	3,52	6,53	6,53	6,40	6,45	6,50
Sulfatação	9,30	9,14	8,95	8,93	10,42	10,62	10,73	9,04	9,98	10,10
Fosfatos	10,75	10,30	10,24	10,22	11,08	10,62	11,17	10,58	10,91	10,96

Fonte: Autoria própria.

ANEXO A – RELATÓRIO DE INTERFEROMETRIA





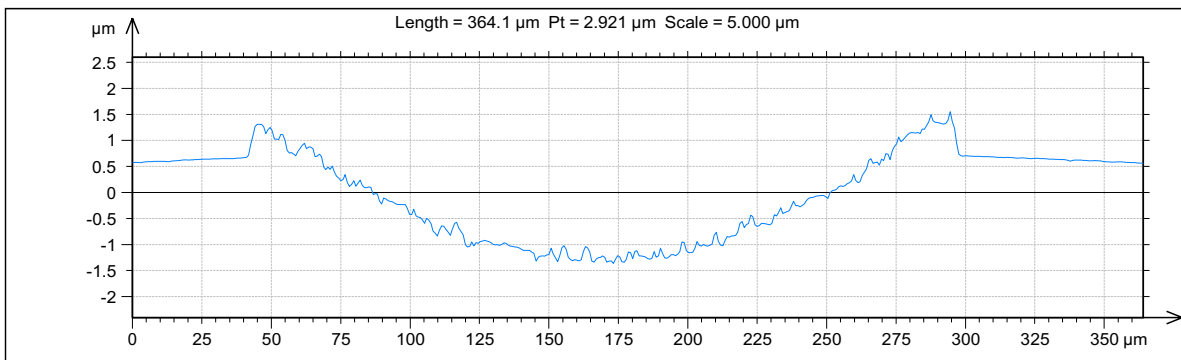
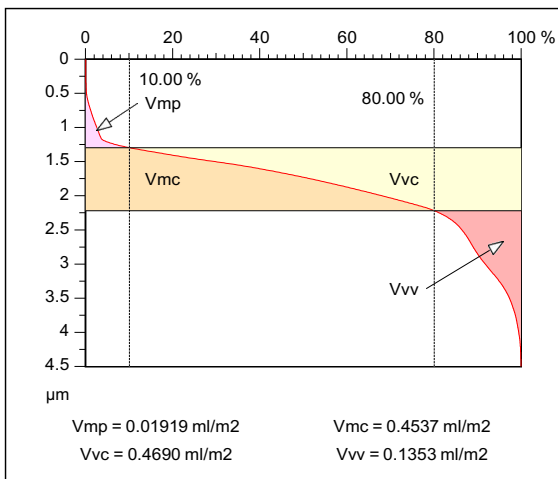
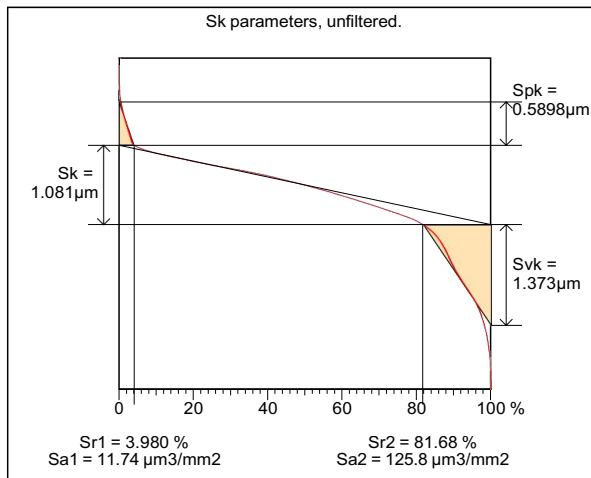
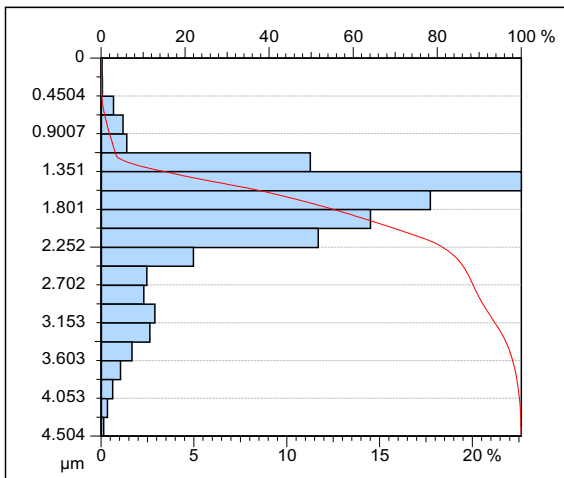
GAUSS FILTER ROUGHNESS 0.8

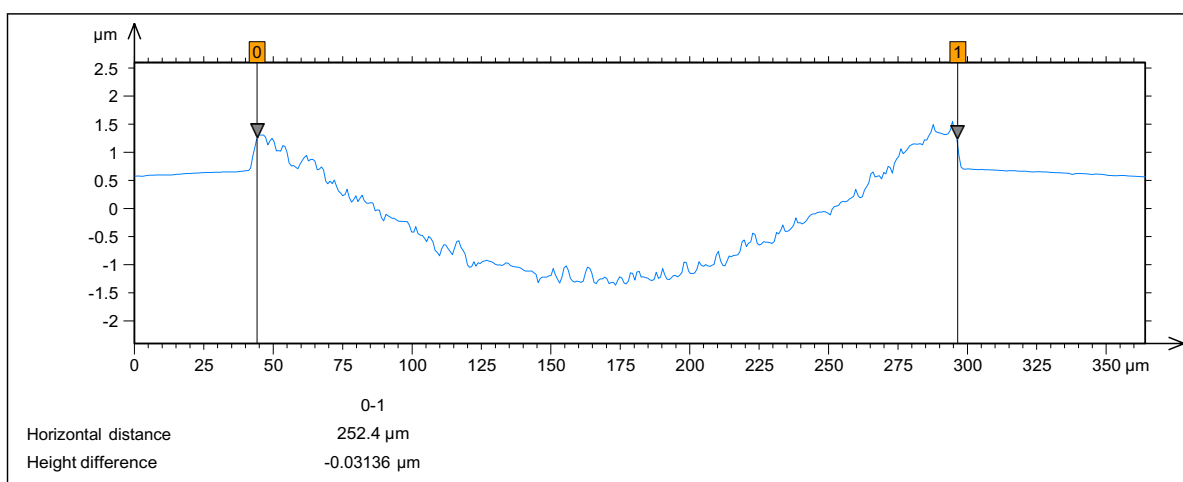
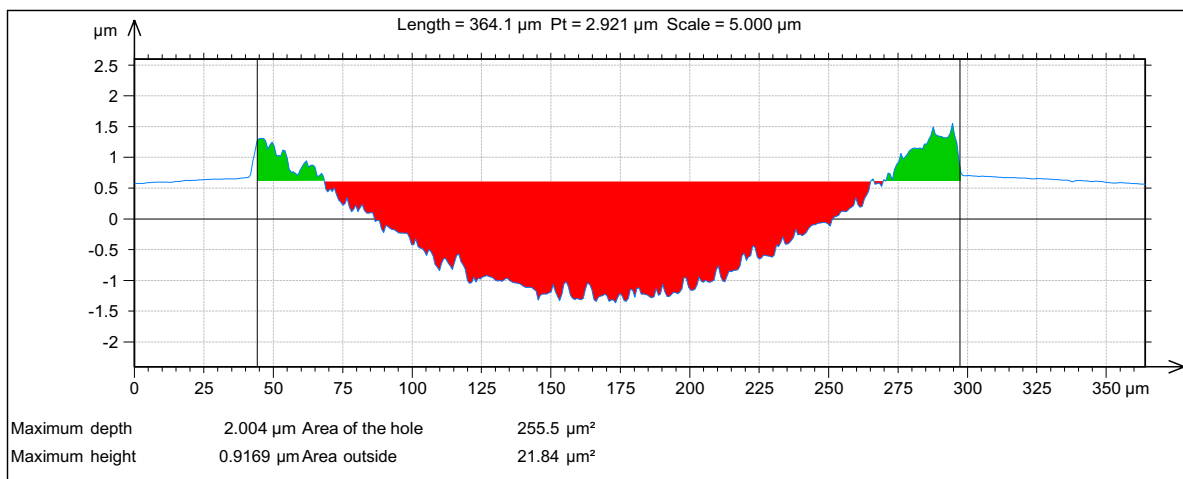
FORM

EUR 15178N		
Amplitude Parameters		
Sa	0.4143	µm
Sq	0.5592	µm
Sz	4.089	µm
Ssk	-0.79	
Sku	4.073	
Sp	1.988	µm
Sv	2.287	µm
Functional Parameters		
Sk	1.112	µm
Spk	0.4934	µm
Svk	1.212	µm
Sr1	8.416	%
Sr2	86.62	%
Spq	*****	
Svq	*****	
Smq	*****	
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.5592	µm
Ssk	-0.79	
Sku	4.073	
Sp	1.988	µm
Sv	2.287	µm
Sz	4.275	µm
Sa	0.4143	µm

EUR 15178N		
Amplitude Parameters		
Sa	0.4688	µm
Sq	0.6276	µm
Sz	4.487	µm
Ssk	-1.217	
Sku	4.619	
Sp	1.880	µm
Sv	2.624	µm
Functional Parameters		
Sk	1.081	µm
Spk	0.5898	µm
Svk	1.373	µm
Sr1	3.980	%
Sr2	81.68	%
Spq	0.4133	
Svq	0.8471	
Smq	33.91	
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.6276	µm
Ssk	-1.217	
Sku	4.619	
Sp	1.880	µm
Sv	2.624	µm
Sz	4.504	µm
Sa	0.4688	µm

NON FILTERED





FILTERED

