

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DUREZA NO DESGATE DO AÇO SAE 4140

por

Roberto Flores

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2019

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA DUREZA NO DESGATE DO AÇO SAE 4140

por

Roberto Flores

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dr^a. Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Ney Francisco Ferreira

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 21 de junho de 2019.

AGRADECIMENTOS

A minha família, em especial a minha mãe, por todo o apoio e suporte.

Ao professor Ney Francisco Ferreira, que me orientou neste trabalho, com ensinamentos, críticas construtivas e paciência.

Aos meus amigos, antigos e novos, que a Universidade me proporcionou.

A equipe do Laboratório de Tribologia da UFRGS, por todo auxílio durante a elaboração deste trabalho.

Por fim, sou grato a todos que, direta ou indiretamente, me ajudaram nesta jornada.

FLORES, R. **Análise da influência da dureza no desgaste do aço SAE 4140**, 2019. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo analisar o comportamento do desgaste de um aço SAE 4140, que passou por diferentes tratamentos térmicos, para se obter microestruturas e durezas distintas, utilizando um ensaio pino-sobre-disco atritado contra uma esfera de zircônia. Os ensaios foram realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS, utilizando parâmetros controlados de tempo, rotação, raio de deslizamento e força. O desgaste dos discos foi medido pela variação de volume obtido por interferometria e calculado por um algoritmo em um software de cálculo numérico. O desgaste das esferas foi calculado por uma relação matemática entre diâmetro desgastado e volume. Os mecanismos de desgaste observados foram abrasão, adesão e triboquímico. Para os discos de maior dureza o desgaste abrasivo predominou e à medida que a dureza diminuiu o desgaste adesivo e triboquímico passaram a ter maior influência. Através de análise ótica dos discos foi possível medir a quantidade de filme triboquímico na superfície das trilhas, com o intuito de relacionar com o desgaste. Notou-se que o disco com maior quantidade de tribofilme apresentou o menor desgaste, mesmo este possuindo a menor dureza.

PALAVRAS-CHAVE: Dureza, aço SAE 4140, tribofilme, desgaste

FLORES, R. **Analysis of hardness influence on wear of SAE 4140 steel**, 2019. 19 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This work has the objective of evaluating the wear of SAE 4140 steel, which is obtained by heat treatment, to obtain different microstructures and hardness, using a pin-on-disk test rubbing against a zirconia sphere. The tests were performed in the tribometer of Tribology Laboratory of UFRGS, using controlled parameters of time, rotation, sliding distance and force. Disk wear was measured by volume variation obtained by interferometry and calculated by an algorithm in numerical calculation software. The wear of the spheres was calculated by a mathematical relation between worn diameter and volume. The wear mechanisms observed were abrasion, adhesion and tribochemical. For the harder discs, abrasive wear prevailed and as the hardness decreased the adhesive and tribochemical wear began to have greater influence. Through optical analysis of the discs it was possible to measure the amount of tribochemical film on the surface of the tracks, in order to relate them to the wear. It was observed that the disc with the highest amount of tribofilm presented the minimum wear, even having the lowest hardness.

KEYWORDS: Hardness, SAE 4140 steel, tribochemical layer, wear.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3.1. Mecanismos de desgaste	1
3.2. Estudos anteriores	2
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	4
4.1. Materiais	4
4.2. Tribômetro	5
4.3. Medição do desgaste.....	6
4.3.1. Desgaste dos discos	6
4.3.2. Desgaste das esferas.....	6
4.4. Medição da rugosidade.....	7
4.5. Microscopia.....	7
4.6. Análise do percentual de óxidos	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	8
5.1. Desgaste	8
5.2. Mecanismos de desgaste	10
6. CONCLUSÕES	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1. INTRODUÇÃO

Apesar de Jost ter cunhado pela primeira vez o termo tribologia em 1966, desde o século XV já se realizavam experimentos tribológicos, com as primeiras constatações sobre as forças de atrito por Leonardo da Vinci. Com o passar do tempo, cada vez mais tem-se pesquisado e estudado sobre o tema. Isto fica evidente ao pesquisar-se a palavra *wear* no site Science Direct. Comparando os artigos publicados no período de 1996 a 2005 versus a última década (2010 a 2019), evidencia-se um aumento de aproximadamente 230% nas ocorrências do termo desgaste.

Segundo Holmberg e Erdemir, 2017, cerca de 23% de todo o consumo de energia se origina a partir de contatos tribológicos, sendo 20% para superar o atrito e 3% para reposição de peças devido ao desgaste. Os autores ainda afirmam que aproveitando as novas tecnologias de superfície, as perdas de energia devido a atrito e desgaste poderiam ser reduzidas em 40% a longo prazo (15 anos) e 18% no curto prazo (8 anos). Em escala global, essas economias representariam 1,4% do PIB anualmente e 8,7% do consumo total de energia no longo prazo.

Em estudo recente, Mayrhofer, 2019, realizou ensaios pino-sobre-disco de um aço SAE 4140 contra esferas de zircônia com uma força normal de 200 N. Cinco durezas e microestruturas foram obtidas nos discos através de tratamento térmico. A autora não observou uma relação direta entre dureza e resistência ao desgaste, divergindo da expectativa de que o disco com maior dureza deveria ter o menor desgaste. Outra contradição foi a baixa correlação entre microestrutura e desgaste, que encontra uma explicação no trabalho de Trevisiol et al., 2017, que afirmam que o efeito da microestrutura diminui para cargas normais elevadas. Essa é uma das motivações deste trabalho, realizar os ensaios tribológicos com uma força menor (100 N) para verificar se o comportamento do desgaste é o mesmo apresentado no trabalho de Mayrhofer, 2019.

2. OBJETIVOS

O objetivo desse trabalho é analisar a influência da dureza sobre o desgaste de um aço SAE 4140 ensaiado contra esferas de óxido de zircônio. Os objetivos específicos são:

- Realizar ensaios em um tribômetro para avaliar o desgaste;
- Análise microscópica para identificação dos mecanismos de desgaste;
- Medir o desgaste dos discos e esferas por interferometria;
- Avaliar a importância de cada mecanismo frente a variação da dureza do material.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Mecanismos de desgaste

De acordo com Donald H. Buckley, 1981, “Desgaste é a remoção de material de uma ou ambas superfícies sólidas em contato de estado sólido. Ocorre quando as superfícies sólidas estão em movimento de deslizamento, rolamento ou fricção em relação ao outro”.

Os mecanismos de desgaste são classificados de diversas maneiras por autores diferentes. A DIN 50320 classifica o processo de desgaste através dos seguintes mecanismos: adesão, abrasão, fadiga superficial e reação triboquímica. A figura 3.1 mostra esquematicamente estes mecanismos.

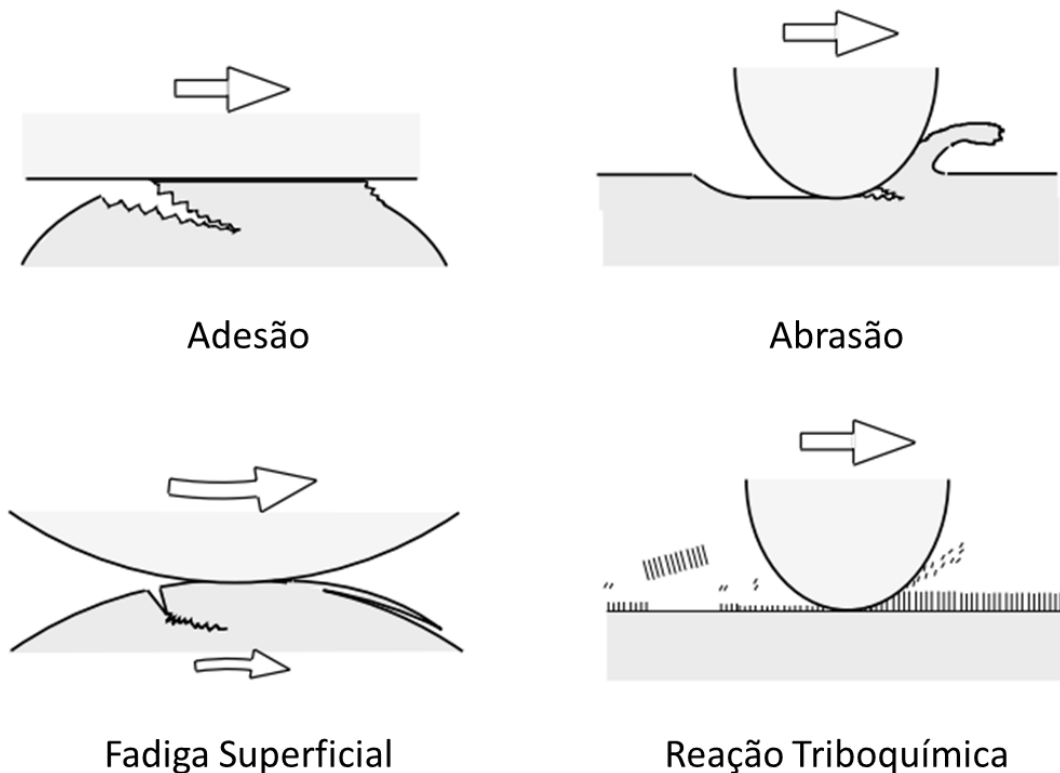


Figura 3.1 – Mecanismos de desgaste (adaptado de Kato e Adachi, 2001).

O desgaste por adesão ocorre quando duas superfícies em contato atômico são submetidas a altas pressões, resultando em deformação plástica, adesão e formações de juntas locais. O deslocamento relativo entre as superfícies envolvidas no processo quebra essas juntas e o material é transferido de uma superfície para outra. Em casos extremos a adesão é tão intensa que não é possível separar as peças.

Segundo Zum Gahr, 1987, o desgaste por abrasão é causado pelo movimento relativo de partículas duras contra superfícies sólidas. Essas partículas duras podem ser provenientes do meio (fora do tribo-sistema), ou produto do endurecimento de partículas que se despreendem da superfície.

Já o desgaste por fadiga superficial está relacionado a movimentos de rolamento e deslizamento, com conseqüente geração de tensões cíclicas de contato. Essas oscilações causam trincas superficiais ou lascamentos (se a superfície for revestida). As trincas começam em escala microscópica e se propagam gerando perda de material e formação de pequenas crateras nas pistas, falha conhecida como *pitting*.

O desgaste triboquímico se caracteriza pela formação de reações químicas entre as superfícies friccionadas e o meio (gasoso ou líquido). No caso de metais expostos ao oxigênio presente na atmosfera, há formação de óxidos. Os óxidos provenientes dessas reações triboquímicas formam filmes que protegem e diminuem o contato metálico entre o par tribológico, resultando em uma redução da atuação dos demais mecanismos.

3.2. Estudos anteriores

Mayrhofer, 2019, estudou a influência da dureza e microestrutura de um aço SAE 4140 atritado contra uma esfera de óxido de zircônio de 8 mm de diâmetro em um ensaio pino-sobre-disco. Os discos foram submetidos a têmpera e revenimento. O processo de revenimento foi de

duas horas e as temperaturas variaram de 200 a 500°C. Na tabela 3.1 são apresentadas as trilhas ensaiadas nas cinco diferentes condições de tratamento térmico dos discos.

Tabela 3.1 – Tratamento térmico, nomenclaturas e dureza média de cada trilha (adaptado de Mayrhofer, 2019)

Trilha	DT-1	DTR200-1	DTR300-1	DTR400-1	DTR500-1
	DT-2	DTR200-2	DTR300-2	DTR400-2	DTR500-2
	DT-3	DTR200-3	DTR300-3	DTR400-3	DTR500-3
Tratamento Térmico	Temperado	Temperado e Revenido a 200°C	Temperado e Revenido a 300°C	Temperado e Revenido a 400°C	Temperado e Revenido a 500°C
Dureza Média (HRC)	60	54	49	45	39

Para medir o volume desgastado de cada trilha a autora utilizou a técnica de interferometria. Os valores de desgaste obtidos são mostrados na figura 3.2.

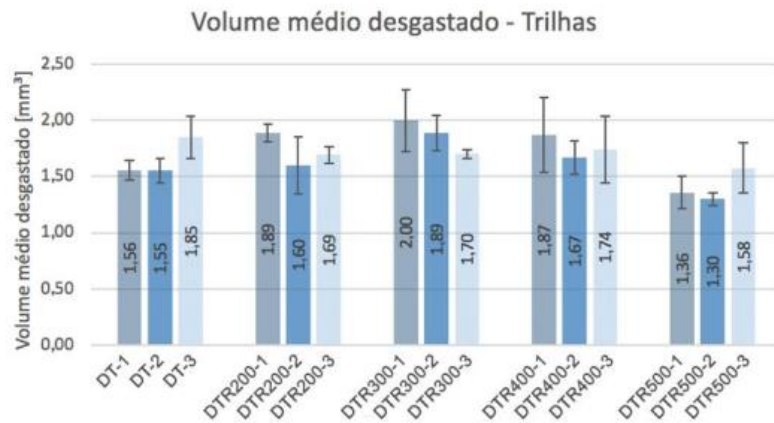


Figura 3.2 – Desgaste volumétrico médio de cada trilha (Mayrhofer, 2019)

Segundo Mayrhofer, 2019, os discos apresentaram desgastes diferentes, mesmo para uma mesma condição de tratamento térmico. Estatisticamente não houve diferença no desgaste dos discos DT-1 e DT-2 (maior dureza) quando comparados ao disco DTR500-3 (menor dureza), sugerindo desgaste semelhante entre discos com microestrutura diferentes. O disco temperado e de maior dureza, não apresentou o maior desgaste.

Trevisiol et al., 2017, realizaram um estudo sobre o efeito da dureza, microestrutura, carga normal e tamanho de abrasivo sobre o atrito e comportamento de desgaste abrasivo de um aço 35NCD16. O ensaio foi realizado atritando o corpo de prova de aço 35NCD16 contra papéis abrasivos (lixas) de diferentes granulometrias. Os corpos de provas foram temperados e revenidos para atingirem diferentes durezas e microestruturas. Além disso, a força normal foi variada entre 50 N e 110 N. A figura 3.3 mostra a taxa de desgaste em função da dureza, para diferentes granulometrias dos abrasivos.

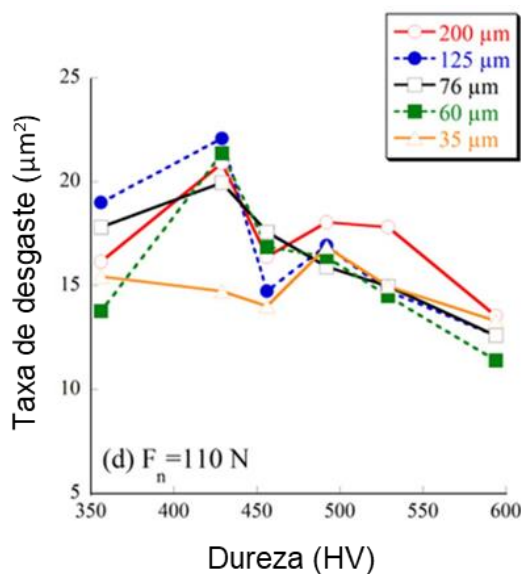


Figura 3.3 – Taxa de desgaste em função da dureza (adaptado de Trevisiol et al., 2017)

Segundo Trevisiol et al., 2017, seja qual for a carga normal, as maiores taxas de desgaste são observadas para uma dureza em torno de 430 a 450 HV. Esse aumento na taxa de desgaste reflete o efeito da microestrutura e uma mudança nos mecanismos de desgaste. Para a microestrutura de transição em torno de 430 a 450 HV, os principais mecanismos de desgaste são abrasão e adesão. As outras microestruturas geram uma predominância de mecanismos de desgaste abrasivos. Também é mostrado que o efeito da microestrutura na taxa de desgaste é reduzido para cargas normais elevadas e/ou para tamanhos de partículas abrasivas finas.

Wang et al., 1999, realizaram um estudo sobre o comportamento tribo-metalográfico de aços alto carbono. Os ensaios foram do tipo pino-sobre-anel sem lubrificação, realizado com pinos de aço 1080 e 52100 friccionados contra um anel de metal duro WC-8% Co. Os pinos passaram por diferentes tratamentos térmicos para obter durezas e microestruturas distintas. Os parâmetros variados nos experimentos foram carga normal e velocidade de deslizamento. A medição de desgaste foi realizada medindo-se a massa dos pinos após cada ensaio, e a partir de uma relação matemática, calculou-se o volume perdido em cada pino. Os autores concluíram que sob condições de desgaste moderado, dominado pela oxidação, a resistência dos aços 52100 e 1080 varia predominantemente com a sua dureza original. Mas não há diferença óbvia no volume de desgaste para várias microestruturas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

Para realização dos ensaios, cinco corpos de prova de aço SAE 4140 foram utilizados. Os discos, apresentados na figura 4.1a, possuem dimensões de 15 mm de espessura e 55 mm de diâmetro. Todos discos foram submetidos a tratamento térmico de têmpera e quatro deles passaram por revenimento em temperaturas variando de 200°C a 500°C, como mostra a tabela 4.1. Após o tratamento térmico, os discos foram retificados e lixados até uma rugosidade menor que 0,1 µm. Os discos utilizados neste trabalho são idênticos aos empregados no estudo realizado por Mayrhofer, 2019.

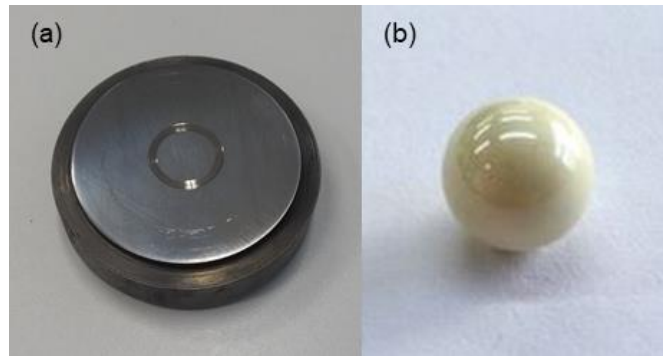


Figura 4.1 – Representação dos discos (a) e esferas (b) utilizados nos ensaios.

Tabela 4.1 – Tratamento térmico das amostras.

Nomenclatura	Tratamento térmico
1	Têmpera
2	Têmpera e revenimento a 200°C
3	Têmpera e revenimento a 300°C
4	Têmpera e revenimento a 400°C
5	Têmpera e revenimento a 500°C

Esferas cerâmicas de zircônia, com dimensões de 8 mm, foram utilizadas como contraparte para a realização das trilhas de desgaste no ensaio pino-sobre-disco. A figura 4.1b mostra uma das esferas utilizadas nos ensaios.

4.2. Tribômetro

Para a realização das trilhas de desgaste, foi utilizado o tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como mostra a figura 4.2.

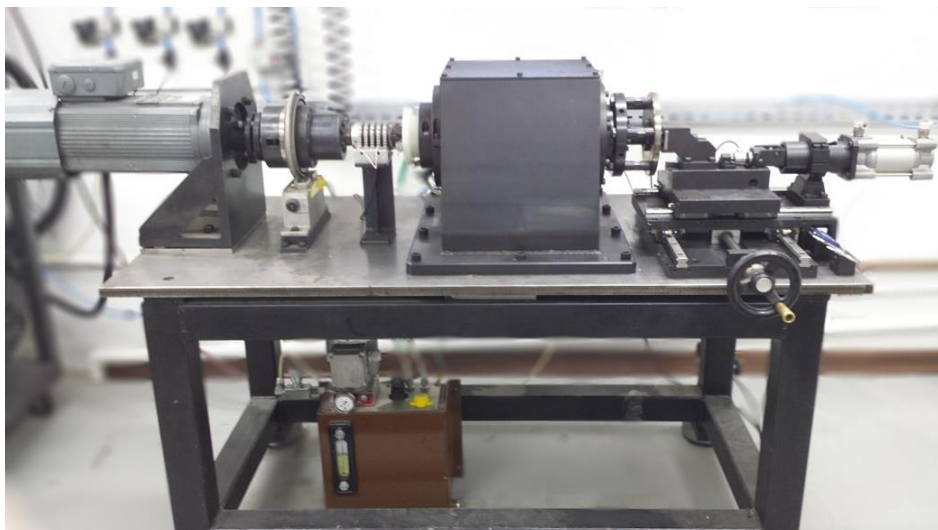


Figura 4.2 – Tribômetro utilizado nos ensaios (Adaptado de Pavlak et al., 2018).

O ensaio consiste em atritar uma esfera contra a superfície do disco, enquanto o mesmo gira em rotação constante. Um atuador pneumático empurra a esfera sobre o disco com uma força determinada previamente, que no caso destes ensaios foi de 100 N. A força é medida em tempo real através de uma célula de carga e mantida através do sistema de controle do tribômetro. Na tabela 4.2 são mostrados os parâmetros utilizados no ensaio, como velocidade, força, raio, rotação e tempo de ensaio.

Tabela 4.2 – Parâmetros de procedimento de ensaio.

Velocidade (m/s)	Força (N)	Raio (mm)	Rotação (rpm)	Duração de ensaio (s)
0,25	100	8,5	280	7200

4.3. Medição do desgaste

4.3.1. Desgaste dos discos

Para avaliar o desgaste dos discos, foi utilizado um interferômetro da marca Bruker, modelo ContourGT-K. O aparelho varre a superfície do disco em quadrantes selecionados pelo operador e, como resultado, temos valores de coordenadas x, y e z correspondentes à topografia do disco. Esta nuvem de pontos foi importada para o software MATLAB que, através de um algoritmo, calcula o volume que foi desgastado em uma trilha. A figura 4.3 ilustra a superfície do disco com uma trilha, sendo esta trilha a região considerada pela rotina do software para o cálculo do volume.

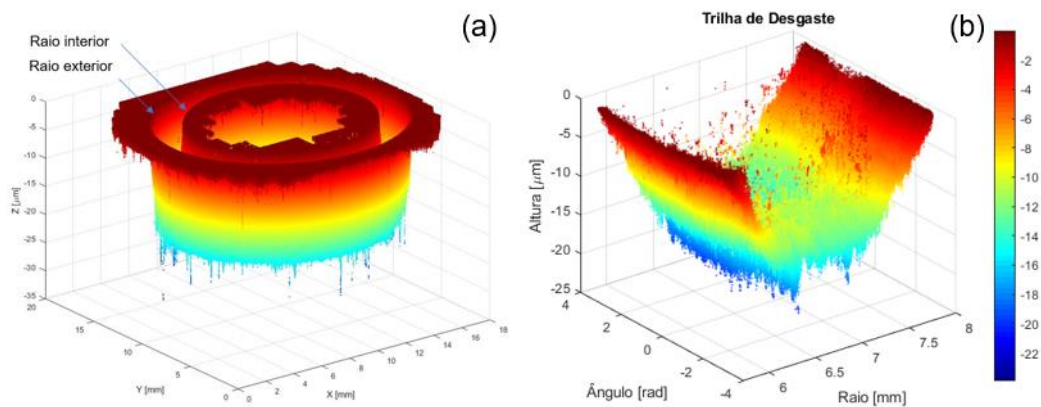


Figure 4.3 – Superfície (a) e perfil (b) da trilha desgastada do disco.

4.3.2. Desgaste das esferas

De acordo com norma a ASTM G99, o desgaste da esfera pode ser medido levando em conta o raio da marca de desgaste que a esfera apresenta após ser submetida ao ensaio, assumindo que não houve um desgaste significativo no disco, conforme a equação 4.1.

$$V = \frac{\pi D^4}{64R} \quad (4.1)$$

Onde:

- V – Volume perdido da esfera (mm^3)
- D – Diâmetro da marca de desgaste (mm)
- R – Raio da esfera (mm)

Analisando a topografia da esfera obtida por interferometria e com o auxílio do software Vision64, foi possível mensurar o valor do diâmetro da marca de desgaste. O diâmetro da marca de desgaste foi obtido através de uma aproximação de oito pontos (Figura 4.4) ao longo do contorno da superfície desgastada da esfera. O diâmetro resultando deste processo foi o utilizado nos cálculos.

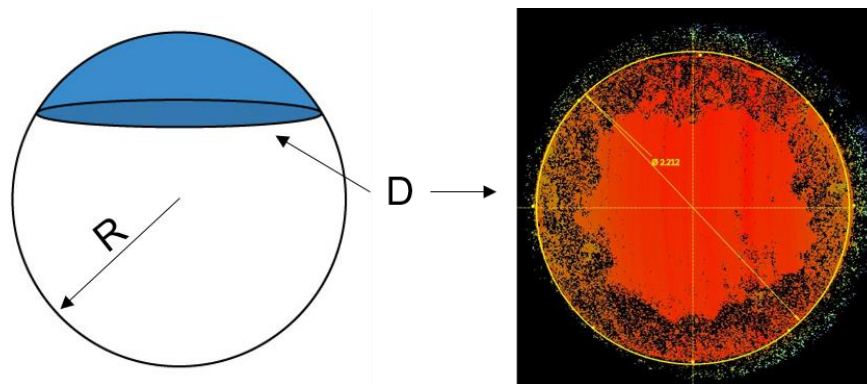


Figura 4.4 – Medição da marca desgastada da esfera, imagem da superfície obtida pelo software Vision64.

4.4. Medição da rugosidade

A rugosidade das trilhas foi medida a partir dos dados obtidos por interferometria. O software utilizado foi o Vision64, que permite selecionar somente a região do disco contendo as trilhas. Como resultado o software fornece o parâmetro de rugosidade média (R_a) correspondente à superfície da trilha.

4.5. Microscopia

As trilhas foram analisadas em um microscópio Zeiss, modelo Axio Lab.A1, visando a identificação dos mecanismos de desgaste. O microscópio possui uma câmera acoplada, além de um software especializado para aquisição de imagens (AxioViosion SE64). Foram adquiridas imagens de uma região representativa de cada trilha. Essas imagens foram processadas no software Photoshop visando a montagem de uma panorâmica de cada trilha, como mostra a figura 4.5.

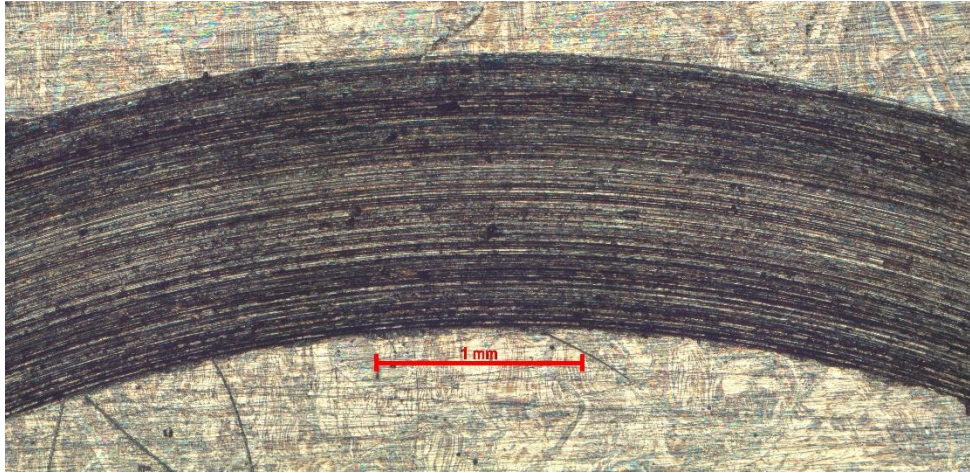


Figura 4.5 – Imagem da trilha de desgaste.

4.6. Análise do percentual de óxidos

Para quantificar o filme triboquímico nos discos, foi realizada uma contagem do percentual da área da trilha recoberta com óxido, que visualmente aparece como regiões escurecidas nas imagens obtidas no microscópio. Utilizando o software ImageJ foi realizado a conversão da imagem colorida para tons de cinza (8-bit). Após esse procedimento e utilizando um algoritmo de limiarização através do método de Otsu, a imagem é binarizada, onde a região escura representa o filme de óxido e a clara o metal do disco. Posteriormente, quantifica-se a região com óxido percentualmente com relação à área total da trilha (figura 4.6).

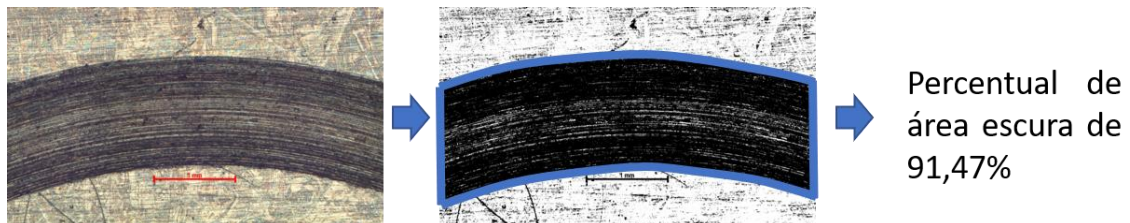


Figura 4.6 – Processo de obtenção do percentual de área escura (com camada de óxido) da trilha.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Desgaste

Foram efetuados dez ensaios no total, dois em cada disco, sendo as faces identificadas como A e B. Os valores de dureza (tabela 3.1) utilizados nesse trabalho, são os mesmos do estudo de Mayrhofer, 2019, visto que foram os mesmos discos utilizados em ambos os trabalhos.

O volume desgastado em cada trilha é mostrado na figura 5.1a. Observa-se que, mesmo para microestruturas e durezas iguais, o desgaste apresenta valores diferentes, mesmo comportamento observado no estudo de Mayrhofer, 2019.

Verifica-se um aumento de desgaste à medida que a dureza diminui, como pode-se observar nos discos 1 a 3. Já nos discos 4 e 5, constata-se que conforme a dureza diminui, o desgaste também decresce. A diminuição do desgaste ao passo que a dureza reduz é contrário ao que a bibliografia clássica afirma. Conforme Khruschov, 1974, para um ensaio abrasivo, a resistência ao desgaste de um material aumenta à medida que sua dureza cresce.

Analisando o desgaste na figura 5.1b, observa-se que os valores do desgaste das esferas diminuem à medida que a dureza nos discos decresce, com exceção da esfera 3B, que apresenta um alto valor de desgaste em relação à sua equivalente (3A). As hipóteses para explicar o comportamento do desgaste dos discos e das esferas serão formuladas na seção seguinte, com a análise dos mecanismos de desgaste.

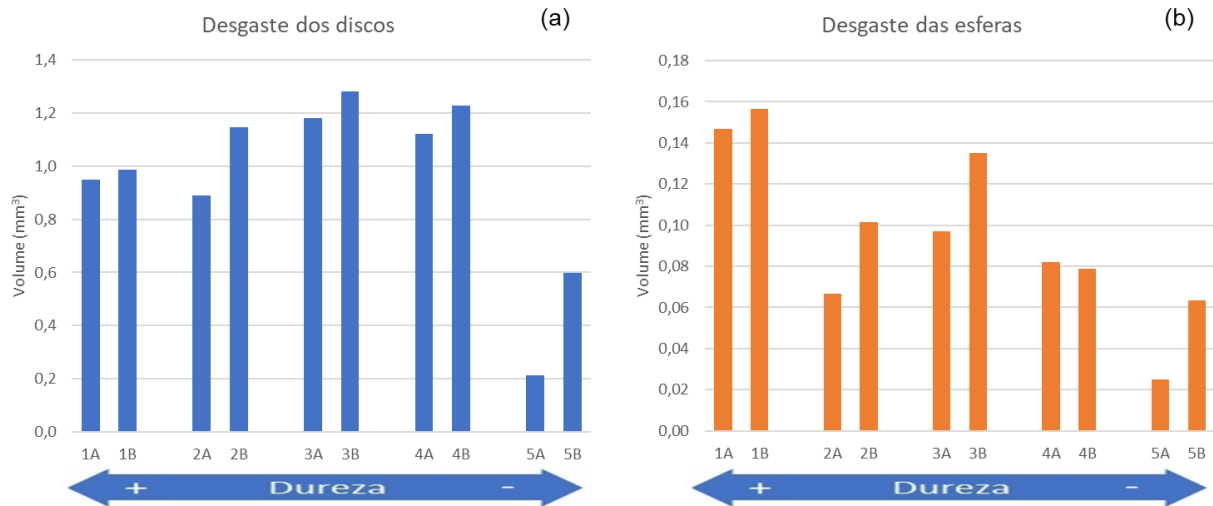


Figura 5.1 – Desgastes dos discos (a) e esferas (b).

A figura 5.2, exibe os valores de rugosidade das superfícies das trilhas. O comportamento da rugosidade aparenta estar correlacionado com o comportamento de desgaste dos discos, visto que nos discos 1 a 3 os valores, tanto de rugosidade quanto de desgaste, crescem. Já nos discos 4 a 5 os valores decrescem.

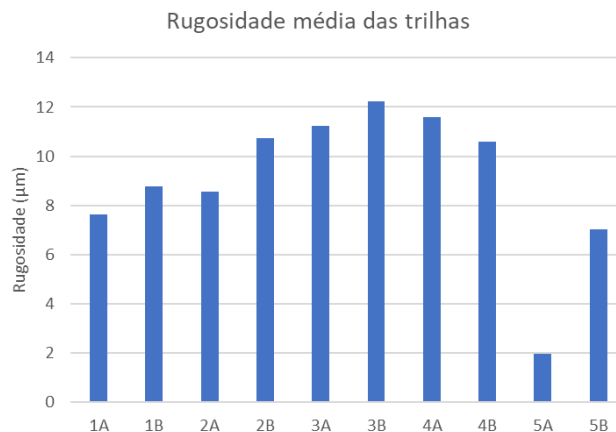


Figura 5.2 – Rugosidade média das trilhas.

A figura 5.3a mostra o desgaste médio das trilhas medido neste trabalho, com uma força de 100 N. No mesmo gráfico é apresentado o desgaste com uma força de 200 N, resultado obtido por Mayrhofer, 2019, que utilizou os mesmos discos. Constata-se o mesmo comportamento do desgaste para ambos os casos, visto que para uma dureza intermediária ocorreram os maiores valores de desgaste, e para uma menor dureza o menor desgaste. Os discos ensaiados com força de 200 N tiveram um desgaste médio 75% maior que os ensaiados com força de 100 N.

Da mesma forma ao comparar o desgaste das esferas a 100 N e 200 N, apresentados na figura 5.3b, temos um aumento de 210% no desgaste. Porém o desgaste das esferas não seguiu o mesmo comportamento para ambos os ensaios.

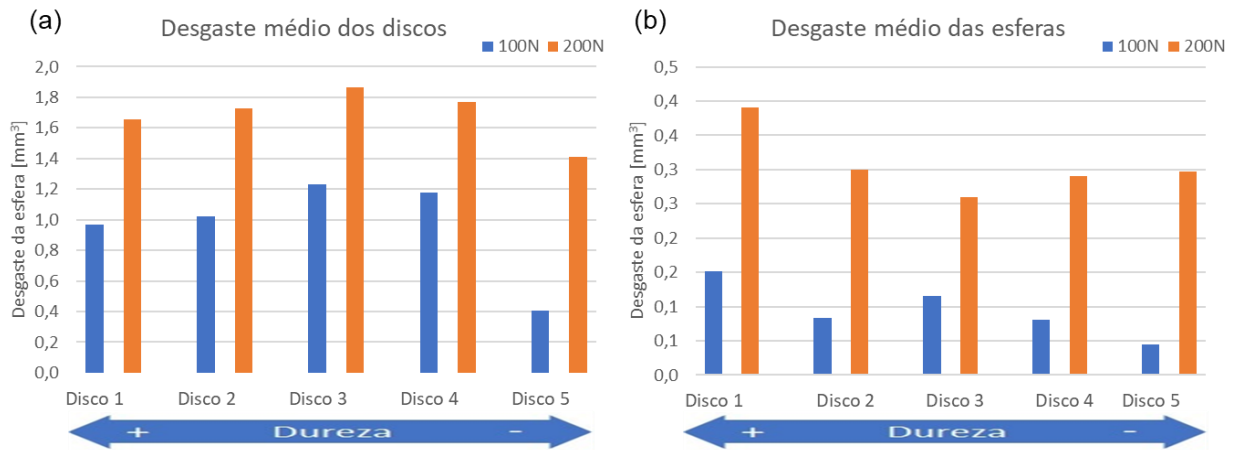


Figura 5.3 – Desgaste médio dos discos (a) e desgaste médio das esferas (b), ensaios de 100N e 200N.

5.2. Mecanismos de desgaste

Para identificação dos mecanismos de desgaste realizou-se a análise microscópica das trilhas e das esferas. Ao observar as trilhas dos discos notou-se desgaste do tipo abrasivo, adesivo e triboquímico. Não foi observado desgaste relacionado à fadiga, possivelmente pelo número de ciclos de carregamento insuficiente para o aparecimento desse mecanismo.

O desgaste do tipo abrasivo foi observado em todos os discos, sendo o principal mecanismo presente nos discos 1 e 2. A figura 5.4a mostra a superfície do disco 2A, onde é possível notar a presença de muitas marcas características de desgaste abrasivo, com a formação de sulcos (conforme indicam as setas). Em um desses sulcos, é possível observar material trioxidado. Na figura 5.4b observa-se com maior nível de detalhamento esse material trioxidado, presente em diversos sulcos. O material presente foi formado pela oxidação do material do disco sendo parcialmente compactado pelo contato com a esfera, o que gerou pequenas ilhas de tribofilme (em destaque na imagem). Tribofilme é o resultado do mecanismo oxidativo que gera uma camada sobre a superfície. Com um aumento de 50 vezes no microscópio, pode-se observar mais claramente o aspecto do tribofilme (no detalhe da figura 5.4c).

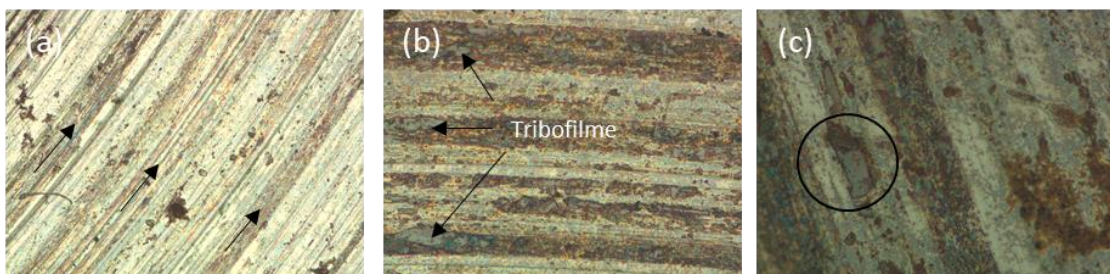


Figura 5.4 – Fotos da microscopia de 3 regiões distintas do disco 2A com aumento do 10x (a), 20x (b) e 50x (c).

Desgaste relacionado a adesão foi observado nos discos 1 a 5. Levando em conta a rugosidade da superfície, que indica uma medida indireta com o mecanismo de desgaste adesivo, constatou-se que a adesão aumentou do disco 1 para o 3, apresentou um comportamento semelhante nos discos 3 e 4, e diminuiu no disco 5.

Como pode-se visualizar no detalhe da figura 5.5a, uma quantidade de material foi removida da superfície do disco pelo mecanismo de adesão. Possivelmente essa partícula removida sofreu deformação plástica por rolamento (encruamento), deixando-a com uma dureza maior que a da superfície da trilha, ocasionando o sulco com um formato de cometa.

As figuras 5.5b e 5.5c demonstram uma camada muito sutil de tribofilme, bem como algumas regiões oxidadas. Essa camada de tribofilme aparenta ser de fina espessura, por isso sua difícil visualização.

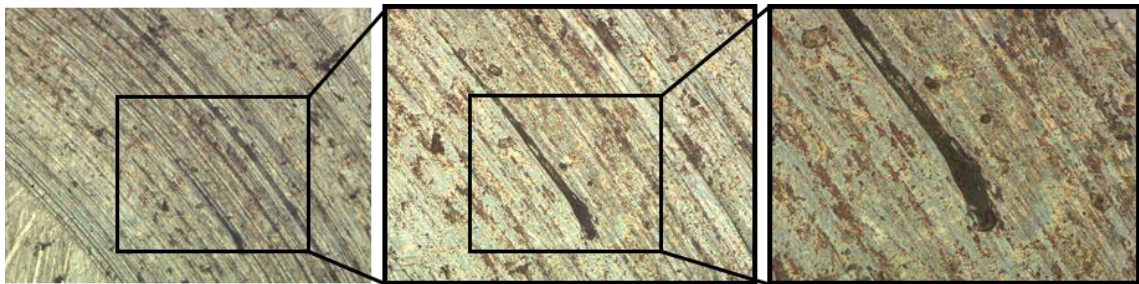


Figura 5.5 – Fotos da microscopia do disco 2B com aumento do 5x (a), 10x (b) e 20x (c).

Desgaste triboquímico foi observado em todos os discos. Esse mecanismo de desgaste aumentou do disco 1 ao 5. Na figura 5.6a é possível observar uma região da superfície da trilha com filme triboquímico depositado, bem como sulcos relacionados ao desgaste abrasivo e crateras, produto do arrancamento de material. Analisando a figura 5.6b é possível observar uma camada de tribofilme que aparenta possuir grande espessura. Na mesma imagem também é possível observar diversas regiões erodidas, que acredita-se ser produto da adesão, destacado com setas, e desgaste oxidativo, indicado com círculos.

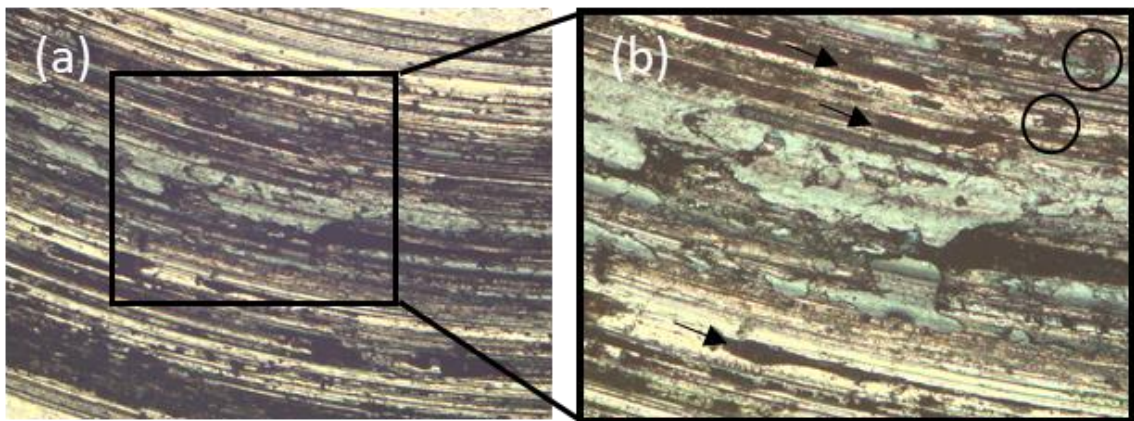


Figura 5.6 – Fotos da microscopia do disco 4A com aumento de 5x (a) e 10x (b).

A figura 5.7 mostra uma imagem dos dez pares tribológicos utilizados nos ensaios. Pode-se observar, do disco 1 ao disco 5, que as trilhas apresentam uma coloração cada vez mais escura indicando uma maior concentração de óxido.

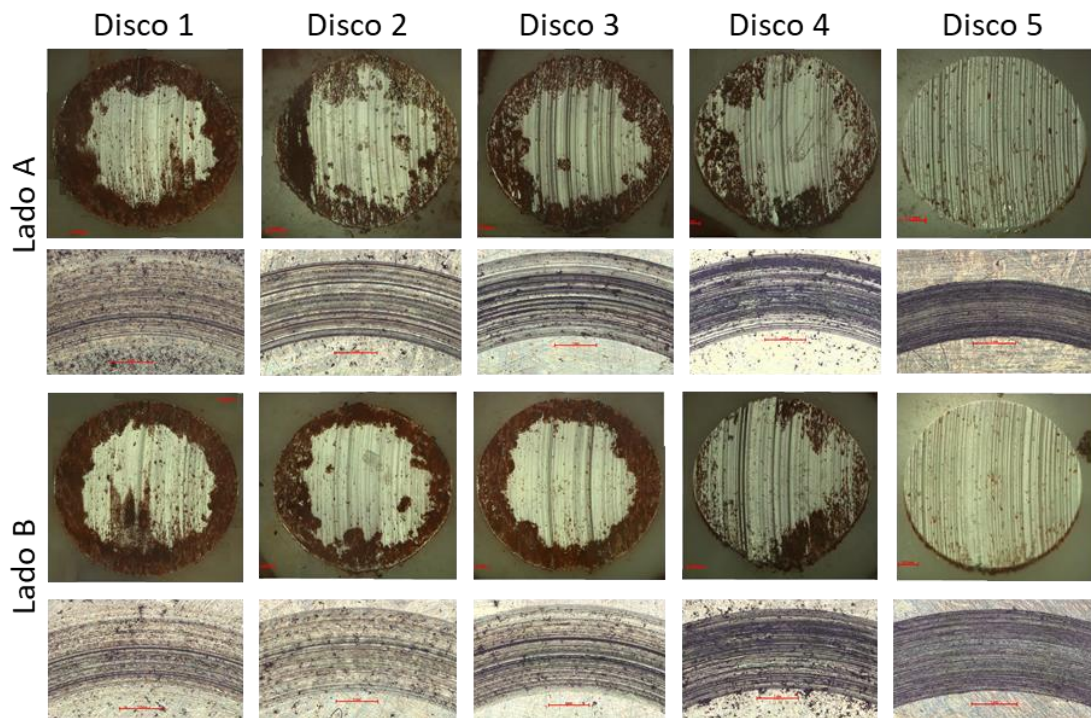


Figura 5.7 – Fotos da microscopia dos discos e esferas.

Visando quantificar a quantidade de óxido formado e, conseqüentemente a influência do mecanismo triboquímico, foi aplicado sobre as imagens das trilhas um critério de limiarização. O resultado desse processo é o percentual de área oxidada com relação a área original. Esse percentual de áreas escuras pode ser observado na figura 5.8. Constata-se que à medida que a dureza diminui, temos um maior percentual de áreas escuras. É bom ressaltar que esse percentual de áreas escuras leva em conta também os sulcos ocasionados pelo desgaste abrasivo e depressões ocasionadas pelo arrancamento de material, visto que na microscopia, esses sulcos e depressões estão em uma topografia mais abaixo que a superfície do disco e ficam representados com uma cor escura ao serem visualizados no microscópio.

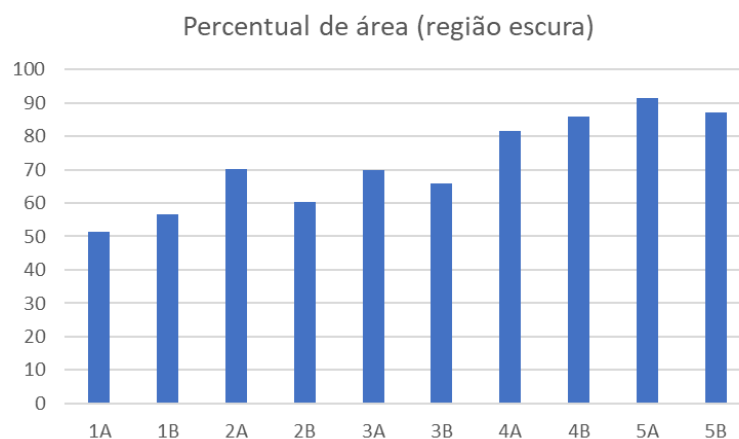


Figura 5.8. Percentual das áreas escuras dos discos.

Ao analisar os valores de desgaste presentes na figura 5.1a, vemos que o disco 5A apresentou o menor desgaste de todos os ensaios. Na figura 5.9, mostra-se a superfície do disco 5A, onde é possível observar uma fina camada de filme triboquímico, espalhada regularmente e recobrindo grande parte da superfície da trilha. Se correlacionarmos o percentual de filme em sua superfície (figura 5.8) com o desgaste, vemos que o menor valor de desgaste foi atingido pela superfície com o maior recobrimento de filme. Isto é corroborado pela bibliográfica que, conforme afirma Zum Gahr, 1987, o desgaste adesivo é reduzido com o aumento das áreas de superfície protegidas. Camadas superficiais finas cobrindo toda superfície podem resultar no menor desgaste do sistema.



Figura 5.9 – Foto da microscopia do disco 5A, aumento de 20x.

Ao analisar as esferas, mostradas na figura 5.7, observa-se incrustações de óxidos em suas superfícies. Essas incrustações estão mais presentes nas esferas que foram atritas contra os discos de maior dureza. Esta observação não foi relatada na literatura consultada e pode ser melhor investigada em futuros trabalhos.

6. CONCLUSÕES

No estudo realizado os resultados não revelaram uma correlação direta entre desgaste e dureza. Nos discos 1 e 2, o mecanismo de desgaste predominante foi o abrasivo. À medida que a dureza diminui, evidenciou-se um aumento no desgaste adesivo e triboquímico. O disco 5A, que possui menor dureza, foi o disco que apresentou menor desgaste. Esse menor valor de desgaste pode ser associado a condições em que o filme triboquímico formado foi distribuído homogeneamente na superfície, protegendo a superfície contra o desgaste adesivo.

Quando se compara os resultados deste trabalho com o estudo de Mayrhofer, 2019, realizado nos mesmos discos, vemos que os discos ensaiados a 200 N tiveram um desgaste 75% maior do que os ensaiados a 100 N. Ainda com bases nesses dois estudos, ao se avaliar o comportamento do desgaste, vemos uma tendência onde os discos de dureza intermediária sofreram o maior desgaste, e os discos de menor dureza apresentaram o menor desgaste.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society for Testing and Materials; “**ASTM G99: standard test method for wear testing with a pin-on-disc apparatus**”, 2004

DIN 50320; “**Wear; terms, systematic analysis of wear processes, classification of wear phenomena**”, 1979.

Donald H. Buckley; **“Surface effects in adhesion, friction, wear and lubrication”**, Elsevier Scientific Publishing Company, 1981.

Holmberg K.; Erdemir, A.; **“Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions”**, 2017.

Karl-Heinz Zum Gahr; **“Microstructure and wear of materials”**, Elsevier, 1987.

Khruschov, M.M.; **“Principles of abrasive wear”**, 1974.

Mayrhofer, A.; **“Comportamento tribológico do aço SAE 4140 temperado e revenido”**, 2019.

Science Direct; **“<https://www.sciencedirect.com/search?q=wear&show=25&sortBy=relevance&origin=home&zone=qSearch&publicationTitles=271461&lastSelectedFacet=publicationTitles>”**. Acessado em 06 de junho de 2019.

Trevisiol, C.; Jourani, A.; Bouvier, S.; **“Effect of hardness, microstructure, normal load and abrasive size on friction and on wear behaviour of 35NCD16 steel”**, 2017.

Wang, Y.; Lei, T.; Liu, J.; **“Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding I. Wear mechanisms and their transition”**, 1999.

Wang, Y.; Lei, T.; Liu, J.; **“Tribo-metallographic behavior of high carbon steels in dry sliding II. Microstructure and wear”**, 1999.