UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

RAPHAEL OLIVEIRA FERREIRA

Caracterização microestrutural de discos metálicos de aço AISI 4140 após ensaios tribológicos do tipo pino-disco, usando pinos de alumínio 6082-T6, cobre C10200 e latão C36000

São Paulo

2019

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS

RAPHAEL OLIVEIRA FERREIRA

Caracterização microestrutural de discos metálicos de aço AISI 4140 após ensaios tribológicos do tipo pino-disco, usando pinos de alumínio 6082-T6, cobre C10200 e latão C36000

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador: Prof. Dr. Cesar Roberto de Farias Azevedo

São Paulo

2019

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 28 de junho de 2019

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catalogação-na-publicação

Ferreira, Raphael Oliveira

Caracterização microestrutural de discos metálicos de aço AISI 4140 após ensaios tribológicos do tipo pino-disco, usando pinos de alumínio 6082-T6, cobre C10200 e latão C36000 / R. O. Ferreira. -- versão corr -- São Paulo, 2019.

72 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.

1.Tribologia 2. Caracterização dos materiais 3. Microscopia eletrônica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais

DEDICATÓRIA

Ao meu filho Lucas Oliveira Ferreira Flores, que é o melhor presente que Deus já me deu.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Cesar Roberto de Farias Azevedo, pela compreensiva orientação, pela ajuda nesta etapa tão difícil e por ter me feito acreditar que eu posso superar as dificuldades, os obstáculos, as dúvidas e o perfeccionismo para atingir meus objetivos.

Ao Prof. Amilton Sinatora, pelo enorme incentivo e por ter sido a primeira pessoa a abrir as portas do mundo da pesquisa para mim. Isso fez toda a diferença.

À Prof. Izabel Machado, pela ajuda, compreensão e incentivo, e por ter aberto as portas do Laboratório de Fenômenos de Superfície e da microscopia eletrônica de varredura para mim. O aprendizado e desenvolvimento que a senhora me proporcionou nestes anos no laboratório são incalculáveis.

Aos professores Gilberto Francisco Martha de Souza e Rodrigo Lima Stoeterau, pela compreensão e pelo incentivo a continuar estudando.

Aos colegas de pesquisa do Laboratório de Fenômenos de Superfície, em especial ao Iramar Tertuliano, à Ana Cecília Pontes Rodrigues, ao Gabriel Borba Galvani e ao Gustavo Tressia, pela inestimável ajuda que vocês me deram, pelas discussões e por cada conversa, seja ela relacionada à pesquisa ou não. Vocês não sabem o quanto me ajudaram.

Aos colegas técnicos do LFS pela enorme ajuda, em especial ao Fábio do Nascimento, ao Rodnei Santos e ao Cassio Junqueira.

À minha mãe Marly Oliveira Ferreira, por ter me incentivado a vida inteira a ser uma pessoa melhor e por ter me ensinado desde cedo o quão importante é o estudo. Te devo tudo, mãe.

Ao meu filho Lucas, que é o que de melhor me aconteceu na vida, e por quem eu quero ser a melhor pessoa possível.

À minha querida Luana Flores, companheira de toda hora e que faz minha vida mais especial a cada dia que passa. Com você eu sinto que tudo é possível.

RESUMO

Foram realizados ensaios tribológicos do tipo pino-disco com pinos de cobre puro, alumínio e latão para sob cargas normais de 10, 20 e 50 N contra discos de aço, que foram analisados após os ensaios utilizando interferometria óptica 3D e microscopia eletrônica de varredura.

O par tribológico cobre-aço apresentou curva de coeficiente de atrito instável, com valor médio de 0,65. Os pares alumínio-aço e latão-aço apresentaram curvas de coeficiente de atrito mais estáveis que aquelas apresentadas nos ensaios com pinos de cobre, com valor médio de coeficiente de atrito de 0,42 e 0,30, respectivamente. Tanto nos discos ensaiados com pinos de cobre quanto nos pinos ensaiados com pinos de alumínio observou-se a formação de filmes ricos em oxigênio.

A formação de ilhas de cobre metálico provocou a instabilidade do comportamento do coeficiente de atrito do par cobre-aço, enquanto que o par alumínio-aço teve um comportamento mais estável devido as ilhas de óxido de alumínio. Nos ensaios utilizando pinos de latão, por sua vez, a presença de chumbo e oxidação moderada da superfície foi responsável pelo menor e mais estável coeficiente de atrito dos três pares tribológicos.

O aumento da carga normal não alterou o comportamento do coeficiente de atrito, porém teve influência na formação das camadas de material aderido do pino na superfície dos discos.

ABSTRACT

Pin on disc tribotests were performed with copper, brass and aluminium pins tested against steel discs under normal loads between 10 and 50 N and characterized by means of laser interferometry and SEM. Copper-steel tribotests showed an unstable coefficient of friction curve around 0.65. Aluminium-steel and brass-steel tribopairs featured stable coefficient of friction curves, around 0.42 and 0.30, respectively. Both copper-steel and aluminium-steel pairs presented oxygen rich transfer films. An adhesion of metallic copper patches caused the unstable coefficient of friction for the copper-steel, whereas for the aluminium-steel tribopair, the oxide layer controlled the coefficient of friction behaviour. An oxygen rich layer with some lead controlled the coefficient of friction for the brass-steel tribopair. Increasing the normal load did not affect the coefficient of friction but affect the formation of transfer layers.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Economia através da aplicação dos conhecimentos em tribologia no Reino Unido em 1966, como mostrado pelo relatório do Departamento de Educação e Ciência. 1
Figura 2 - Ilustração esquemática de um tribossistema: I) Meio interfacial: envolve teorias de lubrificação, filmes triboquímicos e tribopartículas; II) Sólidos em contato: envolve as teorias de deformação, fratura, fadiga, interação material / meio e transferência de material; III) Componente mecânico e seu entorno: relacionado à dinâmica do componente. 3
Figura 3 - Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste por deslizamento. Por exemplo, um elevado coeficiente de atrito pode resultar em elevada tensão tangencial, causando elevada deformação plástica e posterior formação de debris, que ao sofrerem deformação subsequente têm sua dureza elevada e atuam como abrasivos, desgastando o material. 4
Figura 4 - Área real de contato superficial. 4
Figura 5 - Mecanismos de desgaste durante o ensaio por deslizamento: (a) Adesão; (b) Fadiga de contato por deformação plástica em materiais dúcteis; (c) Fadiga de contato resultando em trincas em materiais frágeis; (d) Reação triboquímica e trincamento dos tribofilmes. 6
Figura 6 - Formação do tribofilme a partir das partículas de desgastes originadas pela remoção das asperezas das tribosuperfícies. 8
Figura 7 - Representação esquemática do contato entre o disco e a pastilha de freio 9
Figura 8 - Esquema representativo das diversas aplicações de ensaios tribológicos 10
Figura 9 - Geometrias utilizadas nos ensaios de desgaste por deslizamento. . 11
Figura 10 - Representação de sistema de freio automotivo. (a) Automóvel; (b) Modelo esquemático de sistema de freio à disco automotivo; (c) Micrografia de pastilha de freio automotivo obtida por microscopia eletrônica de varredura. .. 14
Figura 11 - Desenho do disco de aço 4140. 18
Figura 12 - Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6010LA. 21
Figura 13 - Durômetro Buehler VMT-3. 22
Figura 14 - Equipamentos utilizados para a preparação metalográfica das amostras; (a) Máquina de corte abrasivo Struers; (b) Embutidora Buehler; (c) Politriz Struers. 23
Figura 15 - Perfilômetro 3D CCI Taylor Hobson. 24
Figura 16 - Tribômetro Bruker DFH 10. 25
Figura 17 - Representação esquemática das regiões do disco analisadas. 26
Figura 18 - Microestrutura inicial do disco de aço AISI 4140, composta de colônias de perlita e grão equiaxiais de ferrita. IES-MEV. 500X. Ataque: Nital 5% por 30 segundos. 31

Figura 19 - Microestrutura inicial do pino de cobre C10200. Grãos equiaxiais de fase alfa com a presença de maclas de deformação plástica e precipitação de óxido de cobre (pontos escuros). (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. IER-MEV; 500X. Ataque: Cloreto férrico hexa hidratado (9,1g) com 30 ml de HCl concentrado e 100ml de água destilada por 30 segundos. 32
Figura 20 - Microestrutura inicial do pino de latão C36000. Matriz de fase alfa e precipitados de fase beta e varetas de chumbo (área branca). (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. IER-MEV; 500X. Ataque: Cloreto férrico hexa hidratado (9,1g) com 30 ml de HCl concentrado e 100ml de água destilada por 30 segundos. 33
Figura 21 - Microestrutura inicial do pino de liga alumínio 6082-T6. (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. Microestrutura composta de grãos de fase alfa e precipitados intermetálicos lamelares contendo Al, Fe, Si, Mg e Mn. IER-MEV; 500X. Ataque: Cloreto férrico hexa hidratado (9,1g) com 30 ml de HCl concentrado e 100ml de água destilada por 30 segundos. 34
Figura 22 - Evolução do coeficiente de atrito médio com o aumento da carga normal para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco. 35
Figura 23 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 10 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco. 36
Figura 24 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 20 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco. 37
Figura 25 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 50 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco. 37
Figura 26 - Perda de massa dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco. 38
Figura 27 - Perda de massa dos pinos de alumínio, cobre e latão após os ensaios pino-disco. 38
Figura 28 - Condição inicial de rugosidade dos discos de aço 4140. (a) Perfil 2D; (b) Perfil 3D. 39
Figura 29 - Perfis 3D das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de alumínio com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b).41
Figura 30 - Perfis 3D das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de cobre com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b). ... 41
Figura 31 - Perfis 3D das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de latão com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b). 41
Figura 32 - Perfis 3D das superfícies dos pinos de alumínio após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N. 42
Figura 33 - Perfis 3D das superfícies dos pinos cobre após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N. 42

Figura 34 - Perfis 3D das superfícies dos pinos de latão após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N. 42
Figura 35 - Condição inicial da superfície do disco de aço AISI 4140 com aumento de 100X: (a) Detalhe topográfico da superfície do disco, IES, MEV; (b) Contraste de composição química na mesma área, IER, MEV. 43
Figura 36 – Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de cobre contra disco de aço carbono com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 45
Figura 37 - Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de cobre contra disco de aço carbono com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 45
Figura 38 - Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de alumínio contra disco de aço carbono com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 46
Figura 39 - Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de alumínio contra disco de aço carbono com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 46
Figura 40 - Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de latão contra disco de aço carbono com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 47
Figura 41 - Superfície do disco do ensaio tribológico com pino de latão contra disco de aço carbono com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 47
Figura 42 - Seção transversal do disco de aço do ensaio tribológico com pino de cobre com carga de 20 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 48
Figura 43 - Seção transversal do disco de aço do ensaio tribológico com pino de alumínio com carga de 20 N. (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 48
Figura 44 - Seção transversal do disco de aço do ensaio tribológico com pino de latão com carga de 20 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV. 49
Figura 45 - Seção transversal do pino de cobre ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS. 51
Figura 46 - Seção transversal do pino de alumínio ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS. 51

Figura 47 - Seção transversal do pino de latão ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS. 51
Figura 48 - Ensaio pino disco com pinos de cobre puro e de cobre com adição de chumbo. (a) Ensaio com pino de cobre puro com diferentes cargas normais; (b) Ensaio com pino de cobre com 20% de chumbo com diferentes cargas normais; (c) Ensaio com pino de cobre com 40% de chumbo com diferentes cargas normais; (d) Comportamento das quatro ligas em função da carga normal aplicada no ensaio..... 57
Figura 49 - Comportamento do coeficiente de atrito do par tribológico latão-aço. (a) Efeito da variação da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito; (b) Efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito; (c) Efeito da temperatura no coeficiente de atrito. 58
Figura 50 - Evolução da rugosidade com o aumento da carga normal. Para todos os materiais de pinos houve aumento da rugosidade Sa das superfícies dos discos de aço..... 59
Figura 51 - Perfis de rugosidade 2D dos pares tribológicos após os ensaios pino-disco. (a) Par alumínio-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente; (b) Par cobre-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente; (c) Par latão-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente. 60
Figura 52 - Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo e da aplicação de corrente elétrica com variação atmosférica. (a) Coeficiente de atrito estável em torno de 0,67 com aplicação de 40 amperes de corrente com atmosfera de argônio; (b) Coeficiente de atrito estável em torno de 0,60 sem aplicação de corrente com atmosfera de argônio e oxigênio; (c) Coeficiente de atrito instável em torno de 0,58 com aplicação de 40 amperes de corrente com atmosfera de argônio e oxigênio. 62
Figura 53 - Comportamento do coeficiente de atrito do par tribológico latão-aço com o aumento da pressão de contato para diferentes condições de pressão atmosférica e vácuo. 64
Figura 54 - Evolução do coeficiente de atrito em durante o deslizamento de alumínio contra aço endurecido ao cromo com carga de 50 N e velocidade de deslizamento de 1 m/s. 65
Figura 55 - Representação esquemática da tribosuperfície de amostras de alumínio fundido sem e com refino de grão indicando as forças atuando sobre as amostras..... 65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química de algumas pastilhas de freio automotivo obtidas por análise de espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS), desconsiderando os elementos C e O. 13
Tabela 2 - Propriedades das ligas utilizadas no presente estudo. 20
Tabela 3 - Composição química do disco de aço AISI 4140 29
Tabela 4 - Composição química do pino de cobre C10200..... 29
Tabela 5 - Composição do pino de latão C36000 29
Tabela 6 - Composição do pino de alumínio 6082-T6..... 29
Tabela 7 - Dureza Vickers especificada e medida dos materiais 30
Tabela 8 - Valores de coeficiente de atrito médio e desvio padrão. 36
Tabela 9 - Consolidação dos resultados. 52
Tabela 10 - Comparação do coeficiente de atrito e do desgaste em atmosferas de ar, oxigênio e argônio com carga normal de 10 N, corrente elétrica de 0 e de 40 A e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s. 62
Tabela 11 - Valores médios de coeficiente de atrito de metais e ligas deslizados contra aço com 0,13% de carbono. 66

SUMÁRIO

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
1.1 Tribologia 1
1.1.1. Desgaste por deslizamento 4
1.1.2. Formação de tribofilme 6
1.2. Ensaios de deslizamento 10
1.2.1. Ensaios tribológicos do tipo pino-disco 12
1.3. Sistema de freio 12
1.3.1. Pastilhas de freio 13
1.3.2. O papel do cobre nas pastilhas de freio 14
1.4. Legislação 15
2. MOTIVAÇÃO 16
3. OBJETIVOS 17
4. MATERIAIS E MÉTODOS 18
4.1. Materiais 18
4.1.1. Discos 18
4.1.2. Pinos 18
4.1.3. Microanálise química EDS dos pinos e discos 20
4.1.4. Medição de dureza dos pinos e dos discos 22
4.1.5. Caracterização microestrutural dos pinos e discos 23
4.2. Métodos 25
4.2.1. Ensaio tribológico do tipo pino-disco 25
4.2.2. Caracterização dos corpos de prova após os ensaios tribológicos 26
4.3. Tratamento de dados experimentais 27
5. RESULTADOS 29
5.1. Condição inicial 29
5.2. Evolução do coeficiente de atrito 35
5.3. Perda de massa dos discos e pinos 37
5.4. Análise topográfica das superfícies dos discos e pinos 39
5.5. Caracterização topográfica dos discos de aço 43
5.6. Caracterização microestrutural da seção transversal dos discos de aço após ensaios tribológicos 48

5.7. Caracterização microestrutural da seção transversal dos pinos após ensaios tribológicos 49
5.8. Consolidação de resultados 52
6. DISCUSSÃO 53
6.1. Discussão geral 53
6.2. Efeito da carga no coeficiente de atrito 56
6.3. Instabilidade do coeficiente de atrito 61
6.4. Efeito do material do pino no coeficiente de atrito 63
7. CONCLUSÕES 67
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69

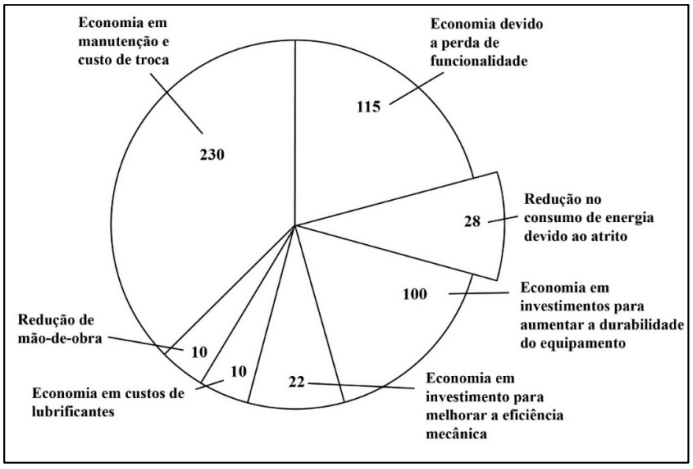
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 Tribologia

A tribologia é o estudo do desgaste, atrito e lubrificação, e abrange as mais variadas áreas da ciência e da engenharia, como a engenharia mecânica, a metalúrgica e de materiais, a química, a física, etc. Foi definida pela primeira vez por Jost, em 1966, a partir da necessidade de se estudar os processos de desgaste, atrito e lubrificação. A palavra deriva da palavra grega Tribos, que significa esfregar, portanto a tradução literal seria “a ciência do esfregamento”. Os primeiros estudos de desgaste registrados e documentados são de Leonardo da Vinci, que já os estudava no século XIV (SINATORA, 2005).

Segundo Jost, aproximadamente £500 milhões poderiam ter sido economizadas no Reino Unido em 1966 ao se dar maior atenção tribologia. Segundo o autor, o estudo da tribologia apresenta uma grande importância para o desenvolvimento econômico e tecnológico, uma vez que perdas significativas resultantes dos processos de desgaste e atrito que ocorrem em máquinas e equipamentos poderiam ser minimizadas através da aplicação de conhecimentos em tribologia, vide Figura 1. (JOST, 1990). Estima-se que a economia pela redução de perdas pode ser 50 vezes maior do que o montante investido em pesquisa em tribologia (BHUSHAN, 2013a).

Figura 1 - Economia através da aplicação dos conhecimentos em tribologia no Reino Unido em 1966, como mostrado pelo relatório do Departamento de Educação e Ciência.



Fonte: Adaptada de (JOST, 1990).

O comportamento tribológico é resultante da interação entre os corpos, que envolve os materiais e superfícies do corpo, contracorpo e terceiro corpo, assim como o meio ambiente e as solicitações mecânicas. Nesse sentido, o coeficiente de atrito e desgaste são parâmetros que descrevem o comportamento de interação dos corpos em um tribossistema (KATO, 2000). Um material pode, por exemplo, apresentar um desempenho satisfatório de resistência ao desgaste contra um material e insatisfatório contra outro, mantendo todas as demais varáveis que definem os respectivos tribossistema constantes.

De acordo com Jacobson (JACOBSON; HOGMARK, 2010), para entender as propriedades tribológicas de componentes mecânicos (tribossistema), é muito importante estudar:

- As superfícies do corpo e contracorpo (tanto na condição inicial como após a condição de deslizamento do par tribológico;
- As propriedades físicas e mecânicas e microestruturais do terceiro corpo (formado, por exemplo, pela interação entre as tribosuperfícies e o meio).

Não será possível prever como um material do tribossistema irá se comportar em termos de coeficiente de atrito e resistência ao desgaste sem o conhecimento de como as superfícies interagem entre si e com o meio, e de como o terceiro corpo é formado e afeta o tribossistema. Logo, o desenvolvimento de novos materiais será muito mais eficiente ao se entender o comportamento do tribossistema e das superfícies durante o deslizamento (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

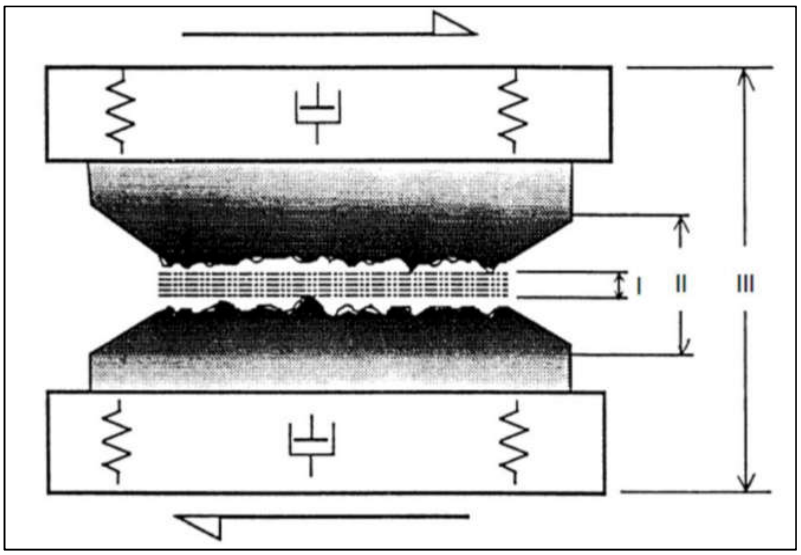
A caracterização microestrutural é um fator importante na tribologia pois permite investigar as alterações topográficas e microestruturais que ocorrem nas superfícies e a formação e transformação do terceiro corpo (meio interfacial ou tribofilme), aprimorando o conhecimento tecnológico sobre o atrito (BLAU, 2009). Desta forma fica evidente a importância e a complexidade da tribologia, cujo desenvolvimento teórico ainda apresenta grandes desafios para a comunidade científica com relação ao melhor entendimento de mecanismos de desgaste, ao

controle do coeficiente de atrito e ao desenvolvimento de produtos (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

A Figura 2 ilustra esquematicamente uma hierarquia dos fatores atuantes na tribologia para cada nível de interação: meio interfacial (terceiro corpo); sólidos em contato (tribosuperfícies) e o componente mecânico (BLAU, 2009; RODRIGUES, 2015).

Por exemplo, o estudo do meio interfacial envolve teorias de lubrificação, de formação de filmes triboquímicos e de tribopartículas. O estudo dos sólidos em contato envolve as teorias de deformação plástica, nucleação e propagação de trincas, fratura, fratura por fadiga de contato, formação de debris, interação entre corpo e contracorpo com o meio (oxidação) e transferência de material (BLAU, 2009). O estudo do sistema tribológico é uma ferramenta moderna para a interpretação e modelamento do atrito, para o desenvolvimento de materiais que controlam o atrito, para o desenvolvimento de testes e métodos para medir o atrito e no desenvolvimento de projetos de máquinas e equipamentos.

Figura 2 - Ilustração esquemática de um tribossistema: I) Meio interfacial: envolve teorias de lubrificação, filmes triboquímicos e tribopartículas; II) Sólidos em contato: envolve as teorias de deformação, fratura, fadiga, interação material / meio e transferência de material; III) Componente mecânico e seu entorno: relacionado à dinâmica do componente.

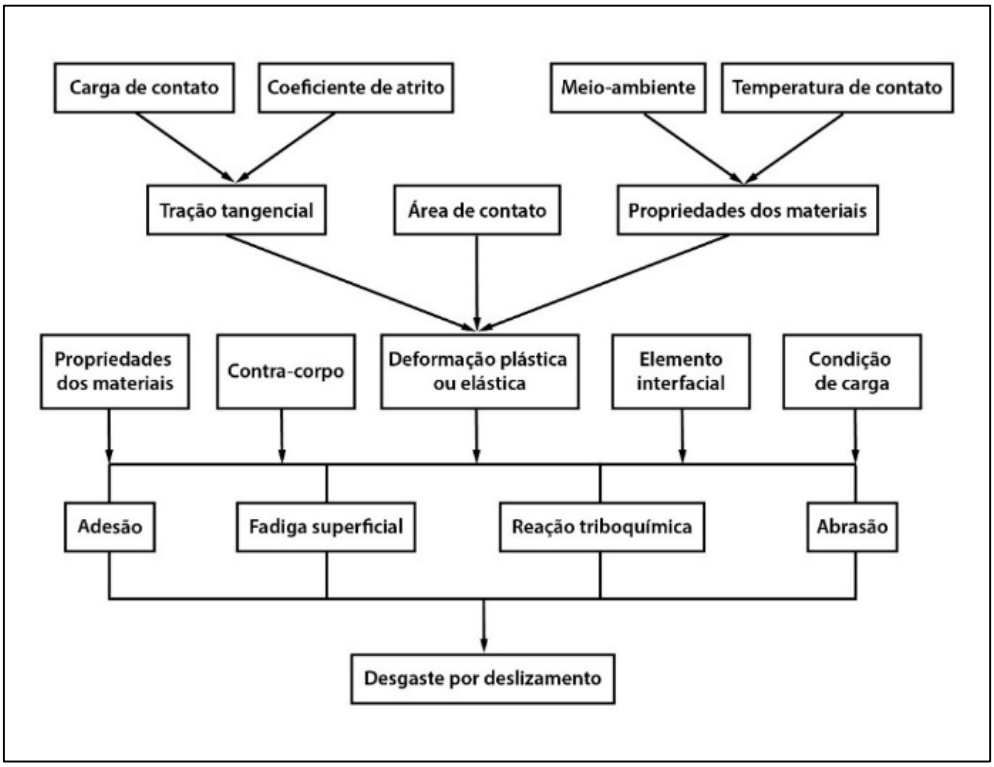


Fonte: (BLAU, 2009)

1.1.1. Desgaste por deslizamento

O desgaste por deslizamento ocorre quando duas tribosuperfícies deslizam uma contra a outra. Vários podem ser os mecanismos de desgaste, como adesão, fadiga de superfície, reações triboquímicas e abrasão, e muitos fatores podem influenciar quais serão os mecanismos de desgaste que ocorrerão, vide Figura 3 (HUTCHINGS, 1992; ZUM GAHR, 1987).

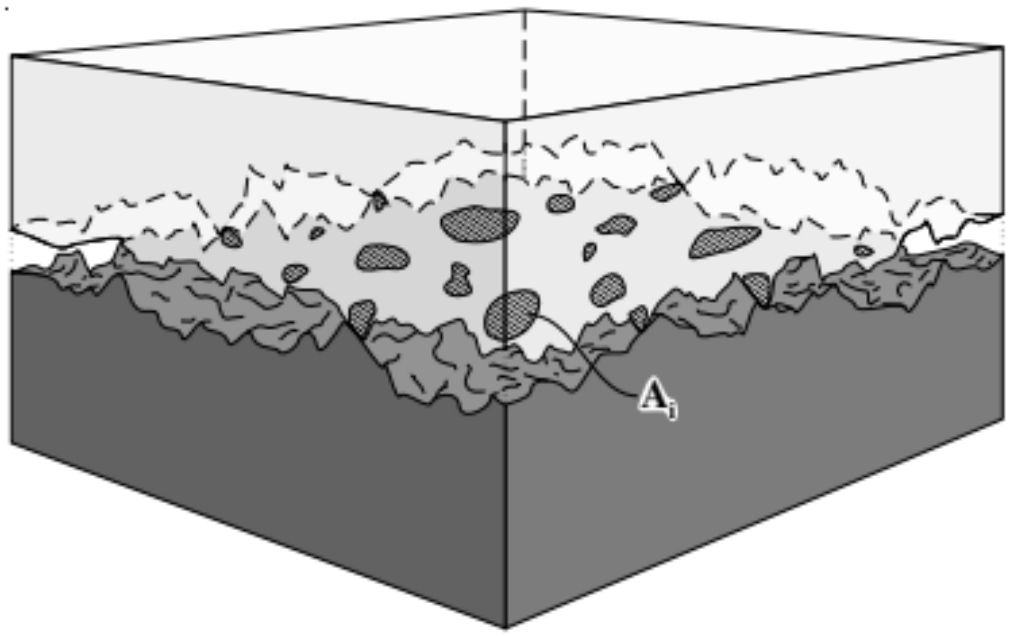
Figura 3 - Fatores que influenciam o mecanismo de desgaste por deslizamento. Por exemplo, um elevado coeficiente de atrito pode resultar em elevada tensão tangencial, causando elevada deformação plástica e posterior formação de debris, que ao sofrerem deformação subsequente têm sua dureza elevada e atuam como abrasivos, desgastando o material.



Fonte: (ZUM GAHR, 1987)

No deslizamento entre dois sólidos não ocorre o contato em toda a área devido à rugosidade superficial, vide Figura 4. Devido as asperezas presentes nas superfícies dos sólidos, o contato é limitado a uma parcela muito pequena da área de contato aparente, chamada de área de contato real, que é a somatória das áreas de contato das asperezas. Com o aumento da carga normal, há um aumento da área de contato real devido à deformação das asperezas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014).

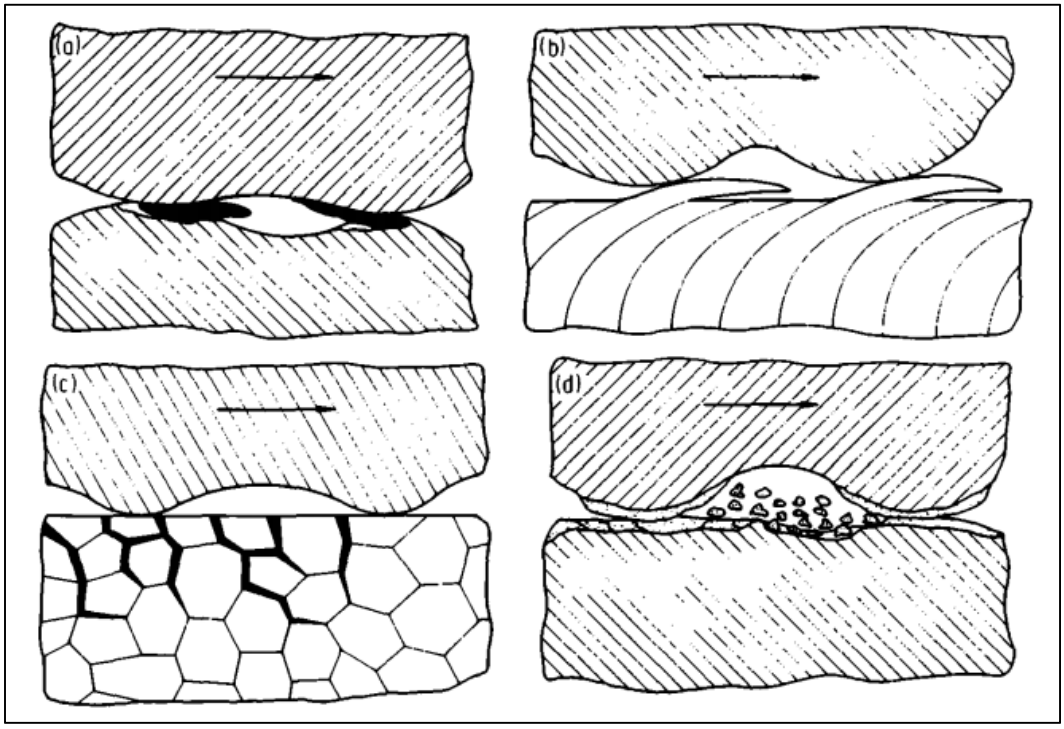
Figura 4 - Área real de contato superficial.



Fonte: (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2014)

Diferentes processos físicos, mecânicos e químicos podem ocorrer durante o desgaste por deslizamento, vide Figura 5. Na adesão podem ser formar uniões pontuais resultantes da fusão dos picos das asperezas do corpo e do contracorpo, vide figura 5 (a). No caso de fadiga de contato por deformação plástica em materiais dúcteis ocorre, por exemplo, o desprendimento e a transferência de material do corpo para o contracorpo (resultado da fadiga mecânica atuando nos pontos de contato, que causa a ruptura de picos e produz material para a transferência). Esse material transferido pode causar, por exemplo a deformação plástica dos picos do corpo. Partículas em forma de placas se formam devido à fadiga de superfície durante a deformação plástica cíclica por um contracorpo mais duro, vide figura 5 (b). No caso de fadiga de contato em materiais frágeis, a tensão de cisalhamento no deslizamento pode levar à formação de trincas, vide figura 5 (c). Finalmente, no caso da reação triboquímica com trincamento dos tribofilmes, as partículas desprendidas do tribofilme podem agir como abrasivos, vide figura 5 (d) (ZUM GAHR, 1987).

Figura 5 - Mecanismos de desgaste durante o ensaio por deslizamento: (a) Adesão; (b) Fadiga de contato por deformação plástica em materiais dúcteis; (c) Fadiga de contato resultando em trincas em materiais frágeis; (d) Reação triboquímica e trincamento dos tribofilmes.



Fonte: (ZUM GAHR, 1987).

1.1.2. Formação de tribofilme

Devido a interação das tribosuperfícies e consequentes mudanças de composição química e microestrutura, que influenciam o comportamento tribológico dos componentes mecânicos, a interface de deslizamento é uma região de condições extremas. O deslizamento causa encruamento, formação de óxidos, de trincas superficiais, transformações de fases e transferência de material de uma superfície para outra, alterando a rugosidade superficial que, segundo Bhushan (BHUSHAN, 2013a), é definida pelas variações topográficas da superfície e formada por picos e vales de variadas amplitudes e espaçamentos, incluindo aqueles oriundos do processo de fabricação, como retífica e fundição. Estas alterações influenciam no comportamento tribológico de um material, pois é a camada superficial que caracteriza o nível de atrito e de resistência ao desgaste dos mais variados componentes de máquinas e

equipamentos, como por exemplo brocas, ferramentas de usinagem e pastilhas de freio (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

Uma transição do desgaste severo para o desgaste moderado pode ser observada quando materiais metálicos deslizam uns contra os outros. No desgaste severo ocorre intensa adesão metálica e as tribosuperfícies são severamente desgastadas, resultando em taxa de desgaste elevada. Já no desgaste moderado, as tribosuperfícies são cobertas por uma camada de óxido protetora (tribofilme), que previne o contato adesivo entre as superfícies metálicas, resultando em uma superfície menos rugosa e menor taxa de desgaste (KATO, 2003).As condições extremas de temperatura, pressão e tensões presentes na interface de deslizamento podem provocar a transferência de material de uma superfície para a outra e interações com o meio, resultando em uma mistura dos materiais, em reações químicas e na formação do tribofilme, que influencia fortemente as propriedades tribológicas dos materiais. Estudar os tribofilmes permite assim tanto a previsão do comportamento quanto o desenvolvimento de novos materiais (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

1.1.2.1. Mecanismos de formação dos tribofilmes

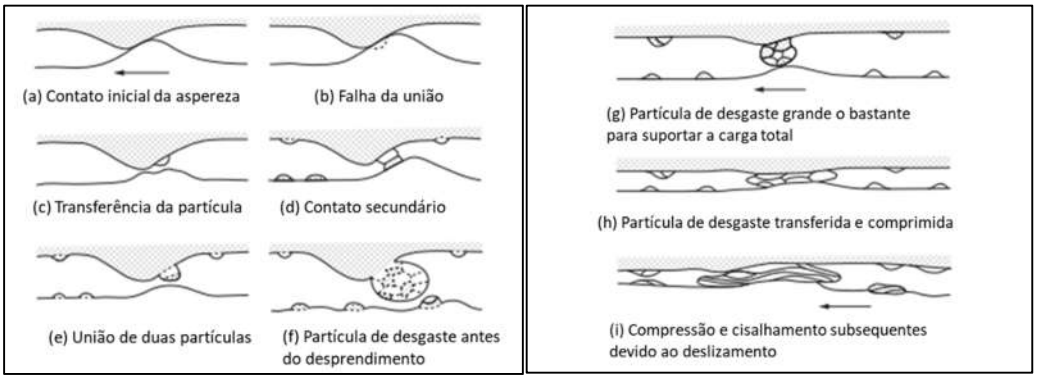
Os tribofilmes podem ser gerados por transformação da superfície, onde o mecanismo de formação pode ser a difusão causada pela interação das superfícies e aquecimento por deformação plástica, não existindo uma interface definida entre o tribofilme e o material do substrato, ou podem ser gerados por aglomeração de partículas, reações químicas e absorção de moléculas, onde o mecanismo predominante é a adesão. Como podem ocorrer tanto a aglomeração de partículas quanto os processos de difusão, os tribofilmes dificilmente são exclusivamente de um tipo ou de outro (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

Os tribofilmes gerados por transformação podem ser divididos em dois subgrupos: os formados pela transformação da superfície original através de difusão, reações químicas e transformações de fase; e os formados por deformação plástica e na formação de trincas, sem difusão ou transferência de material. Nos tribofilmes formados por difusão, esta pode ser dos átomos do núcleo para a superfície, do contracorpo ou do meio interfacial, resultando em

alterações locais de composição química e de fase, segregação, recristalização e crescimento de grão. Nos tribofilmes formados por deformação plástica e formação de trincas, esses mecanismos resultam em encruamento, fadiga de contato, geração de trincas subsuperficiais, formação de texturas, refino de grão e mudanças de topografia (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

Quando formados por difusão, os tribofilmes também podem ser divididos em dois subgrupos: O primeiro, muito comum quando se usa aditivos lubrificantes, formado por átomos e moléculas individuais, que podem vir do contracorpo, de filmes lubrificantes ou do meio e serem absorvidos pela superfície, ou de reações químicas na superfície ou com átomos superficiais. O segundo são os filmes formados por partículas maiores que moléculas que podem vir da tribosuperfície, do contracorpo, do meio ou de algum lubrificante. Estas partículas se aglomeram, são pressionadas e ficam presas na superfície, podendo ficar fracamente aderidas mecanicamente ou se tornarem parte integrante da superfície através de adesão e difusão (JACOBSON; HOGMARK, 2010). A Figura 6 mostra os estágios de formação do tribofilme nas superfícies em atrito.

Figura 6 - Formação do tribofilme a partir das partículas de desgastes originadas pela remoção das asperezas das tribosuperfícies.



Fonte: (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017)

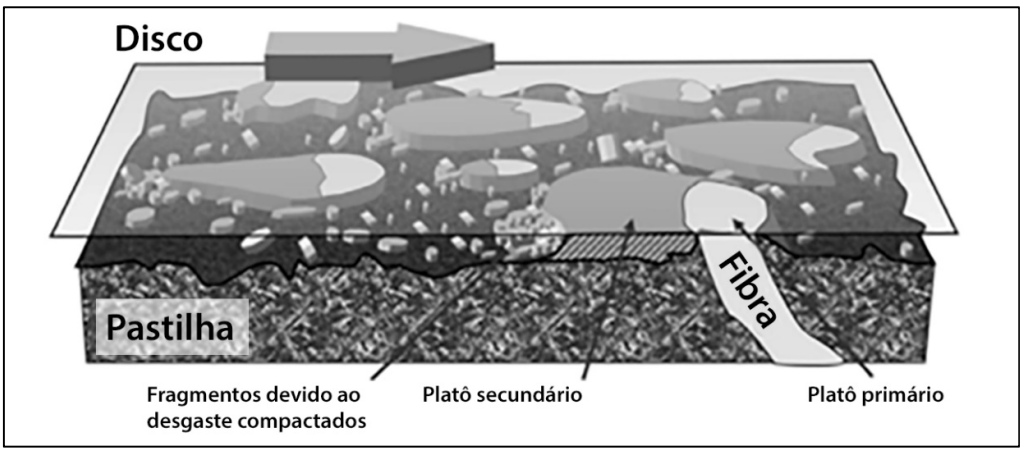
No contato tribológico todos os mecanismos de endurecimento dos materiais podem ocorrer localmente nas tribosuperfícies. Pode ocorrer a formação do tribofilme do tipo de transformação através de encruamento, refino de grão, geração de fase dura e endurecimento por solubilização (causada por

difusão, devido aos átomos estranhos distorcerem o reticulado cristalino da matriz, dificultando a movimentação de discordâncias) e a formação do tribofilme do tipo de deposição na forma de endurecimento por aglomeração de partículas como na mistura e compactação de partículas de óxidos, e endurecimento através da adesão de partículas de desgaste ou do contracorpo. O sucesso de alguns materiais metálicos em aplicações tribológicas é explicado pelo fato destas alterações melhorarem a resistência ao desgaste (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

1.1.2.2. Tribofilmes formados em sistemas de freio automotivo

A interface entre o disco e a pastilha de freio nos freios automotivos é uma região de intensa atividade tribológica. As superfícies estão constantemente se desgastando e se remoldando, com áreas de contato surgindo e se destruindo, enquanto partículas micro e nanocristalinas deslizam pelo labirinto que se forma entre as irregularidades da pastilha de freio e o disco, conforme a Figura 7 (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

Figura 7 - Representação esquemática do contato entre o disco e a pastilha de freio



Fonte: (JACOBSON; HOGMARK, 2010).

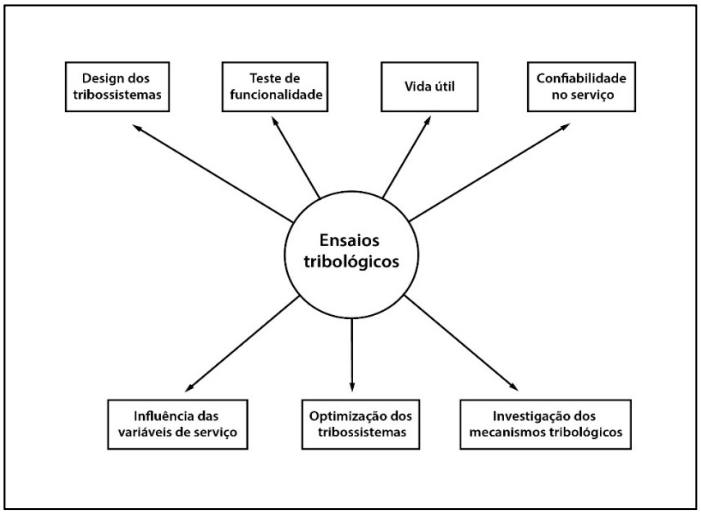
Os sistemas de freio devem fornecer um coeficiente de atrito entre 0,3 e 0,4 em qualquer condição de frenagem, independente da velocidade, temperatura, pressão, presença de água, contaminantes, e devem fornecer este coeficiente de atrito com o mínimo de desgaste, vibração e ruído, e ainda retornar as condições iniciais de frenagem após uma frenagem severa (JACOBSON; HOGMARK, 2010; ÖSTERLE et al., 2009).

Durante a frenagem forma-se uma camada compacta de debris oriundos do disco e do pino entre as superfícies do par tribológico, chamada por Godet (GODET, 1984) de terceiro-corpo, por possuir composição química diferente tanto do disco quanto do pino. O tribofilme se espalha entre as tribosuperfícies, separando o par tribológico, estabilizando o deslizamento e o coeficiente de atrito e evitando a adesão entre o disco e a pastilha. O coeficiente de atrito estará estável enquanto houver tribofilme entre os corpos em deslizamento, mesmo após condições severas de frenagem. Caso o tribofilme se rompa, ele volta a se formar e a estabilizar o coeficiente de atrito, e foi proposto que esta sucessiva formação e quebra do tribofilme é a principal fonte de debris de desgaste (ÖSTERLE et al., 2009).

1.2. Ensaios de deslizamento

Frequentemente o comportamento tribológico de diferentes materiais e/ou lubrificantes precisa ser estudado através de ensaios tribológicos para o desenvolvimento de novos componentes mecânicos, onde se pode investigar as variáveis de serviço nos ensaios de modelo, subcomponente ou componente. Através destes ensaios o projeto de novos componentes pode ser melhorado e a capacidade de simular sistemas complexos em um modelo mais simples é muito importante para os estudos dos mecanismos de atrito, lubrificação e desgaste (ZUM GAHR, 1987). A Figura 8 ilustra os motivos para a realização dos ensaios tribológicos.

Figura 8 - Esquema representativo das diversas aplicações de ensaios tribológicos

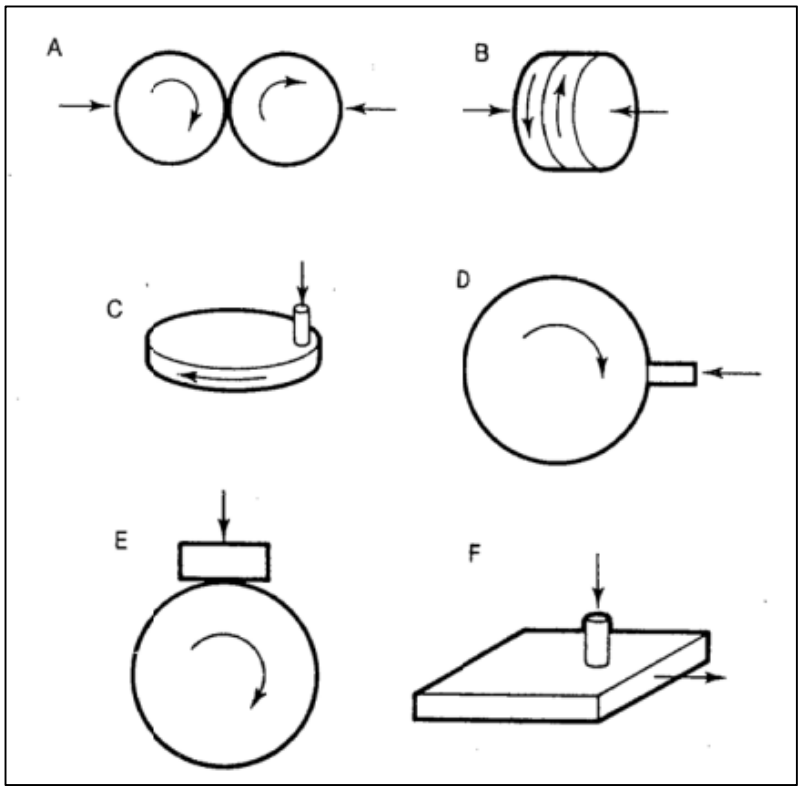


Fonte: (ZUM GAHR, 1987).

A taxa de desgaste não é uma propriedade do material, como o são dureza, módulo de elasticidade ou a densidade. Os ensaios tribológicos são necessários para se conhecer o comportamento de determinado material para condições de atrito e de desgaste específicas, e os ensaios tribológicos podem também fornecer informações importantes sobre a vida útil de um produto (LUDEMA, 1996).

Existem vários métodos de ensaios tribológicos para estudar o desgaste e o atrito. Eles são realizados tanto para examinar os mecanismos de desgaste quanto para simular aplicações práticas, fornecendo informações úteis sobre as taxas de desgaste e do coeficiente de atrito, ambos fortemente dependentes das condições de deslizamento. Pequenas mudanças nas condições de deslizamento podem causar grandes mudanças nos mecanismos predominantes e na taxa de desgaste. Na Figura 9 são mostrados vários arranjos geométricos empregados nos ensaios de desgaste por deslizamento (HUTCHINGS, 1992).

Figura 9 - Geometrias utilizadas nos ensaios de desgaste por deslizamento.



Fonte: (HUTCHINGS, 1992).

É muito importante que as variáveis do ensaio sejam controladas adequadamente para que os resultados sejam úteis tanto na simulação de uma aplicação específica quanto para outros propósitos científicos, como por exemplo o desenvolvimento de novos materiais e lubrificantes (HUTCHINGS, 1992).

1.2.1. Ensaios tribológicos do tipo pino-disco

No ensaio tribológico do tipo pino-disco um pino fixo é pressionado contra um disco rotativo, como mostra a Figura 9 (c). Esta configuração de ensaio é a mais comumente utilizada em pesquisa e desenvolvimento de materiais para aplicações tribológicas (BHUSHAN, 2013b). Estes ensaios têm o objetivo de reproduzir ou simular o comportamento de pares tribológicos em condições controladas que poderiam ocorrer em campo, com o intuito de avaliar, prever ou estimar os valores de coeficiente de atrito e desgaste em condições específicas, permitindo o projeto e substituição de materiais e componentes adequados para determinada aplicação. Uma vantagem dos ensaios tribológicos é que eles nos permitem prever como será o comportamento de uma parte componente em condições específicas, não havendo a necessidade de ensaiar todo o equipamento como, por exemplo, um motor.

1.3. Sistema de freio

Os sistemas de freio convertem energia cinética de um sistema em movimento em calor. Este calor gerado na interface de deslizamento é dissipado principalmente por condução através dos componentes do freio. Os principais sistemas de freio disponíveis para os automóveis são os sistemas a disco e a tambor (AZEVEDO; ÖSTERLE, 2011).

Alguns requisitos específicos de atrito e desgaste devem ser atendidos pelos fabricantes de freio nas operações de frenagem, como um coeficiente de atrito estável entre 0,3 e 0,4 (conforme citado acima, estável para a variedade de velocidades de operação, pressões aplicadas e temperaturas), sem apresentar vibrações e ruídos excessivos e os componentes devem ser fabricados com materiais que não sejam prejudiciais ao meio ambiente (ÖSTERLE et al., 2009). Os materiais dos discos e das pastilhas precisam ter estabilidade térmica para resistir ao desgaste provocado pelo atrito e pelo aquecimento elevado em serviço, que pode atingir uma temperatura de até

800ºC. Outros requisitos que os materiais para os sistemas de freio devem apresentar são boas resistências a compressão, ao cisalhamento e à corrosão, boa condutividade térmica, ser leve e silencioso, apresentar baixa taxa de desgaste e bom custo benefício (AZEVEDO; ÖSTERLE, 2011).

1.3.1. Pastilhas de freio

Os discos de freio automotivo normalmente são fabricados de ferro fundido cinzento perlítico, enquanto as pastilhas de freio são feitas de materiais compósitos que podem ter mais de 30 constituintes, sendo classificadas como *low-metallic* (baixo teor de elementos metálicos) e *Non Asbestos Organic* (sem materiais orgânicos a base de asbesto), vide Tabela 1. Os sistemas de freio automotivo devem apresentar coeficiente de atrito entre 0,3 e 0,6 sob condições normais de frenagem, que depende do tribofilme que se forma entre o disco e a pastilha, e que por sua vez depende da composição química e da mistura dos materiais da pastilha de freio. (FEDERICI et al., 2018).

Tabela 1 - Composição química de algumas pastilhas de freio automotivo obtidas por análise de espectroscopia por energia dispersiva de raios-X (EDS), desconsiderando os elementos C e O.

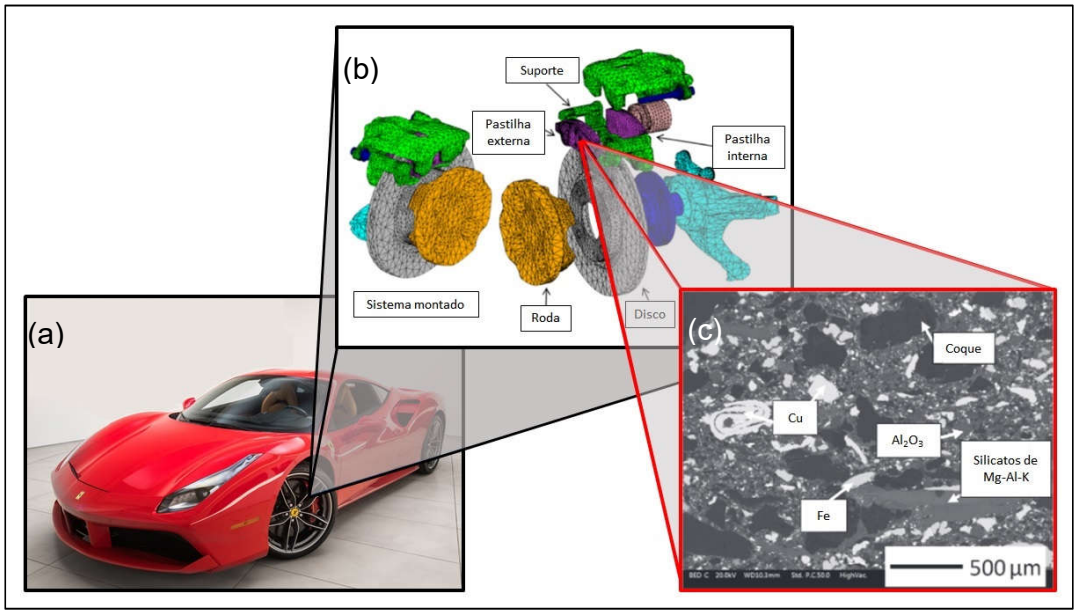
Elemento	Pastilha 1 [peso %]	Pastilha 2 [peso %]	Pastilha 3 [peso %]	Pastilha 4 [peso %]	Pastilha5 [peso %]
Fe	15,8	26,6	21,2	12,4	0,7
Al	10,3	17,8	13,8	5,6	1,3
Mg	11,5	12,2	13,6	1,0	7,4
Cu	13,7	11,3	–	11,0	–
Sn	9,4	8,0	7,2	4,0	3,0
Zn	15,8	6,8	14,9	3,5	–
Ca	7,6	5,9	5,7	2,5	5,0
S	4,9	4,7	9,3	3,3	4,2
Cr	3,1	3,1	4,0	–	–
Si	6,8	3,1	7,4	3,1	4,2
K	–	0,5	–	3,3	6,1
Na	1,1	–	2,9	5,6	1,3
Zr	–	–	–	27,3	30,6
Ti	–	–	–	14,0	27,6
Ba	–	–	–	3,4	6,8
F	–	–	–	–	1,8

Fonte: (FEDERICI et al., 2018)

Durante as operações de frenagem formam-se platôs de contato primários, compostos de partículas duras e fibras metálicas da pastilha de freio, e secundários, formados pelo desgaste da pastilha, que gera debris que se

aglomeram e se compactam contra os platôs primários, gerando um tribofilme. São as características deste tribofilme que determinam o comportamento de atrito e de desgaste do sistema, pois eles são os responsáveis pela transmissão da força de atrito da pastilha para o disco (FEDERICI et al., 2018). A Figura 10 esquematiza o sistema de freio e apresenta a microestrutura de uma pastilha.

Figura 10 - Representação de sistema de freio automotivo. (a) Automóvel; (b) Modelo esquemático de sistema de freio à disco automotivo; (c) Micrografia de pastilha de freio automotivo obtida por microscopia eletrônica de varredura.



Fonte: Adaptado de (DMITRIEV et al., 2008; FEDERICI et al., 2018).

1.3.2. O papel do cobre nas pastilhas de freio

As pastilhas de freio automotivo utilizadas atualmente são constituídas de cobre e muitos outros ingredientes. A maioria delas possui partículas de cobre, latão ou uma combinação de ambos, porém a tendência é que se diminuía o uso do cobre e suas ligas devido ao impacto ambiental da sua utilização (ÖSTERLE et al., 2010). O cobre é utilizado principalmente devido a sua ótima condutividade térmica, evitando o aquecimento localizado das pastilhas de freio, e como reforço mecânico. Durante uso, a tribosuperfície do cobre sofre deformação plástica, encruamento, trincamento e oxidação nas operações de frenagem, promovendo a sua incorporação na microestrutura do tribofilme. A presença de cobre no tribofilme suaviza a frenagem e diminui o ruído do sistema de freios (ÖSTERLE et al., 2010). Encontrar um material que substitua o cobre possuindo boa

condutividade térmica, fornecendo regiões de contato primário entre o disco e a pastilha de freio e melhorando as condições de deslizamento em frenagens severas é uma tarefa de difícil realização (ÖSTERLE et al., 2010).

1.4. Legislação

Em 27 de setembro de 2010 foi assinada pelo o governador do estado da Califórnia a lei *Senate Bill* (SB) 346, proibindo a venda de pastilhas de freio contendo mais que traços de cobre, alguns metais pesados e asbestos, visando diminuir a contaminação do meio ambiente com o cobre e outras substâncias tóxicas. Esta lei determinou que as pastilhas de freio deveriam ter não mais que traços destes elementos até 2014, que contivessem menos que 5% de cobre até 2021 e que reduzissem o teor destes elementos a praticamente zero até 2025 (TOXIC SUBSTANCES CONTROL, 2010).

Começou a se considerar este problema em 1990, quando as cidades próximas a São Francisco começaram a ter dificuldades de reduzir os teores de cobre exigidos pelo *Clean Water Act* presentes no esgoto urbano que flui para a baía de São Francisco. Identificou-se que a principal fonte de cobre contaminante do esgoto eram as pastilhas de freio automotivo, porque pequenas quantidades de cobre caem nas ruas e estacionamentos cada vez que se freia um automóvel (COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC, [s.d.]).

2. MOTIVAÇÃO

O cobre e suas ligas são amplamente utilizados em sistemas de freio automotivo ao redor do mundo. Porém as legislações internacionais buscam diminuir o teor deste elemento nos sistemas de freio devido às suas características nocivas à saúde e ao meio ambiente.

Desta forma, este projeto é relevante porque é necessário o que torna o cobre um elemento importante nos sistemas de freio do ponto de vista tribológico, que se possa aprofundar os estudos já existentes de substituição deste elemento por outros constituintes menos prejudiciais à natureza.

Além disso, a caracterização do tribofilme e da camada deformada plasticamente que se forma durante o deslizamento entre dois materiais metálicos é realizada normalmente através de microscopia de feixe de íons focados, que é uma técnica de difícil realização tanto pelo aspecto financeiro, pois o acesso à estes equipamentos possui um custo elevado, quanto de disponibilidade, então se faz necessário encontrar alternativas para esta análise que sejam acessíveis tanto tecnicamente quanto economicamente.

3. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são a caracterização do comportamento tribológico do cobre puro C10200, da liga de latão C36000 e da liga de alumínio 6082-T6 no deslizamento contra discos de aço AISI 4140 recozidos.

Foram realizados ensaios pino-disco para caracterização do coeficiente de atrito dos três pares tribológicos, e após os ensaios as amostras de discos foram analisadas através de interferometria óptica 3D e microscopia eletrônica de varredura, com o objetivo de verificar os efeitos do deslizamento na superfície e na seção transversal dos discos de aço ensaiados.

Objetiva-se um método de preparação metalográfica que permita a análise do tribofilme e da camada deformada plasticamente na superfície do disco, de forma que se obtenha resultados próximos aos obtidos por microscopia de feixe de íons focados (*focused ion beam*), técnica utilizada para se realizar este tipo de análise, porém de difícil acesso e elevado custo.

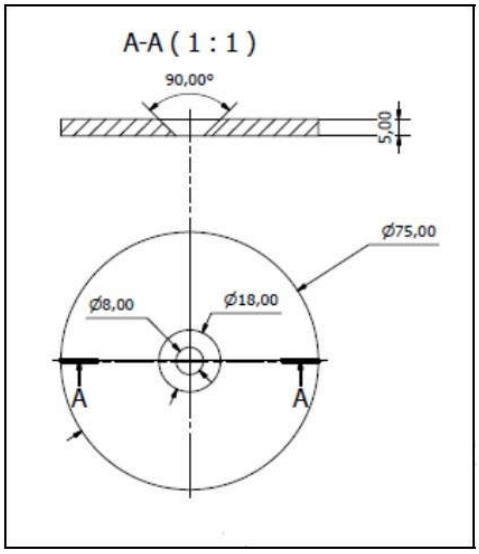
4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Discos

Foram utilizados discos de aço AISI 4140 com 5mm de espessura e 75 mm de diâmetro, vide Figura 11. Os discos foram confeccionados e fornecidos pela empresa Amtek Tekfor sediada em Jundiaí, obtidos a partir de uma barra que foi fatiada, torneada e retificada. Depois de recebidos os discos foram caracterizados através de medição de dureza Vickers, interferometria óptica 3D e microscopia eletrônica de varredura, tanto para análise da topografia inicial das superfícies quanto da microestrutura dos discos.

Figura 11 - Desenho do disco de aço 4140.



4.1.2. Pinos

Foram utilizados pinos de três materiais diferentes nos ensaios tribológicos do tipo pino-disco. A seleção dos materiais dos pinos foi realizada com o *software* Cambridge *Engineering Selector* (CES EduPack, banco de dados nível 3, 2018), impondo três restrições: metais não-ferrosos com boa condutividade térmica, acima de 100 W/m.°C e com valores de dureza entre 90 e 110 HV. Os materiais selecionados foram: liga de cobre ASTM C10200, latão ASTM C36000 e liga de alumínio EN AW-6082 6082-T6.

Os pinos de ligas de cobre C10200 (condição encruada) e de latão C36000 foram fornecidos pela empresa Paranapanema S.A. Os pinos de cobre C10200 foram obtidos a partir de um vergalhão fundido de 12,50 mm de diâmetro, que foi extrudado continuamente e trefilado para 5,00 mm de diâmetro. Um segmento do produto trefilado foi cortado para a retirada de 15 pinos de 20 mm de comprimento.

Os pinos de latão C36000 foram retirados de um tarugo de diâmetro de 228,60 mm que foi extrudado a quente para um diâmetro 8,70 mm de diâmetro, trefilado para diâmetro de 7,20 mm e recozido a 600° C por 8 horas. Após o recozimento, o arame foi trefilado para diâmetro de 6,35 mm, recozido novamente a 600° C por 8 horas, trefilado para diâmetro de 5,30 mm, recozido novamente a 600° C por 8 horas e trefilado finalmente para o diâmetro 5,00 mm. Posteriormente um segmento de arame foi cortado para a retirada de 15 pinos de 20 mm de comprimento.

Uma barra de alumínio 6082-T6 com diâmetro de 6,35 mm e 6000,00 mm de comprimento foi comprada da empresa Central de Metais e Ferragens Eireli. A barra foi cortada em vários segmentos, que foram usinados para o diâmetro de 5 mm e foram posteriormente cortados em 15 pinos de 20 mm de comprimento.

A Tabela 2 apresenta as principais propriedades mecânicas e físicas dos materiais utilizados no presente estudo. O chumbo foi incluído na tabela para comparação, por ele ser um dos principais constituintes dos pinos de latão.

Tabela 2 - Propriedades das ligas utilizadas no presente estudo.

	Aço AISI 4140	Alumínio 6082-T6	Cobre C10200	Latão C36000	Chumbo puro
Dureza (HV)	183-223	95-105	80-115	105-140	4-6,5
Limite de escoamento (MPa)	370-460	240-290	180-340	240-300	6-12
Limite de resistência (MPa)	595-720	280-340	270-380	440-520	15-20
Módulo de Young (GPa)	208-216	70-74	128-135	99-105	13-14
Módulo de cisalhamento (GPa)	80-85	25-27	46-50	37-39	4-6
Limite de fadiga a 10^7 ciclos (MPa)	297-341	90-100	115-125	188-210	5-9
Ductilidade (% tensão)	20-31	5-11	6-25	15-25	30-60
Densidade (kg/m^3)	7800-7900	2670-2730	8940-8950	8180-8350	11300-11400
Tenacidade (kJ/m^2)	25-65	17	20	23	16
Tenacidade à fratura (MPa.m^{0,5})	76-120	33-35	39-58	42-49	10-15
Temperatura de fusão (ºC)	1430-1500	575-650	1080	877-897	322-328
Condutividade térmica (W/m.ºC)	42-48	169-175	390-398	120-125	33-36
Oxidação à 500ºC	Aceitável	Péssima	Aceitável	Limitada	-
Resistência ao desgaste adesivo	Aceitável	Limitada	Aceitável	Excelente	-

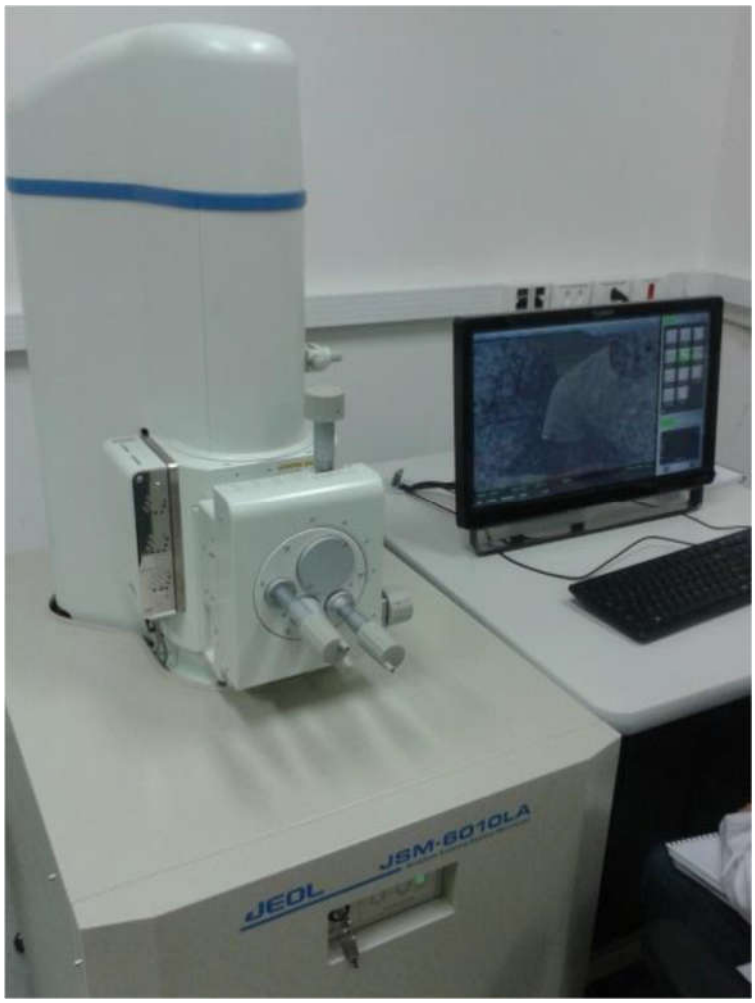
Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

4.1.3. Microanálise química EDS dos pinos e discos

A composição química dos pinos de cobre e de latão foi fornecida pelo fabricante e as composições químicas dos pinos de alumínio e dos discos de aço foram obtidas por microanálise química por espectroscopia de energia dispersiva

(EDS) utilizando um detector EX-94410T1L11 *Dry SD Hyper Detector*, com resolução de 0,01 keV com o Software *In Touch Scope* JSM-6010 versão 1.11 acoplado em um microscópio eletrônico de varredura da marca JEOL, modelo JSM-6010LA, vide Figura 12, no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. A microanálise foi realizada pelo método de correção ZAF, que calcula a concentração de um elemento desconhecido usando a intensidade relativa (K) de raios-X característicos medidos na amostra analisada e comparando-os com uma amostra padrão através do efeito do número atômico (Z), da absorção dos raios-X (A) e do efeito da excitação por fluorescência (F). A microanálise foi realizada com tensão aceleradora de 20 kV, distância de trabalho de 10 mm, diâmetro do feixe de elétrons mantido constante e usando tempo morto de análise (*dead time*) de aproximadamente 20% por tempo de 5 minutos.

Figura 12 - Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6010LA.



4.1.4. Medição de dureza dos pinos e dos discos

A dureza dos pinos e discos foi medida em durômetro Buehler modelo VMT-3 (calibrado pela empresa Holtermann Comercial e Técnica, em 11/08/2017, certificado de calibração número 22107/17) do Laboratório de Fenômenos de Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, vide Figura 13. Carga de 30 kgf foi utilizada para a medição de dureza na superfície dos discos, sendo realizadas cinco medidas em cada disco para cálculo do valor médio e desvio padrão. Para a medição da dureza dos pinos, embutiu-se cada um dos pinos longitudinalmente, que foram lixados em papel com carbeto de silício na sequência granulométrica de #220, #400 até #600, antes das medições. Foram realizadas cinco medições, usando carga de 10 kgf, para cada um dos pinos para possibilitar o cálculo do valor médio e desvio padrão.

Figura 13 - Durômetro Buehler VMT-3.

4.1.5. Caracterização microestrutural dos pinos e discos

As amostras foram preparadas metalograficamente nos equipamentos mostrados na Figura 14. Os discos de aço e os pinos foram preparados por operações de corte, seguidas de embutido a quente e preparação metalográfica (lixamento em carbeto de silício de granulometria #220, #400 e #600, seguido de polimento com diamante de granulometrias de 6, 3 e 1 μm, usando panos de polimento). Para o aço foi usado ataque metalográfico com Nital 5% por 10 segundos, enquanto que os pinos de cobre C10200 e de latão C36000 foram atacados com cloreto férrico (9,1 g) com 30 ml de ácido clorídrico concentrado e 100 ml de água deionizada por 30 segundos. O pino de alumínio 6082-T6 foi atacado com hidróxido de sódio 10%. Após o ataque, todas as amostras foram limpas com água, álcool e secas com ar comprimido.

Figura 14 - Equipamentos utilizados para a preparação metalográfica das amostras; (a) Máquina de corte abrasivo Struers; (b) Embutidora Buehler; (c) Politriz Struers.

A caracterização microestrutural das superfícies iniciais dos discos e pinos foi feita utilizando MEV nos modos de imagem de elétrons secundários (IES, imagem topográfica) e imagem de elétrons retroespalhados (IER, imagem de composição química).

A análise topográfica quantitativa das superfícies iniciais dos pinos e discos foi realizada por interferometria óptica 3D no equipamento Taylor Hobson CCI MP mostrado na Figura 15. Utilizou-se nível de luz de 50%, com lente de 10x de aumento, distância de trabalho de 7,4 mm, modo de análise XY, resolução de 1024 por 1024 pixel (cada pixel medindo 1,7 μm) e velocidade de análise de 5x. Foram feitas cinco medições no disco e calculado um valor médio e desvio padrão de rugosidade Sa.

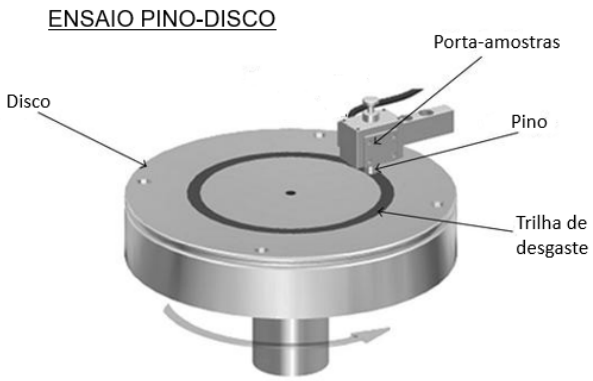
Figura 15 - Perfilômetro 3D CCI Taylor Hobson.

4.2. Métodos

4.2.1. Ensaio tribológico do tipo pino-disco

Ensaios tribológicos do tipo pino-disco foram realizados no tribômetro DFH 10 – Bruker. A Figura 16 mostra a configuração do ensaio pino disco, juntamente com os parâmetros de ensaio que foram utilizados.

Figura 16 – Configuração do ensaio pino-disco.



Parâmetros do ensaio pino-disco	
Carga	10, 20 e 50 N
Pressão nominal de contato	0,5, 1,0 e 2,5 MPa
Velocidade de deslizamento	0,1 m/s
Duração do ensaio	3600 s
Distância percorrida	360 m
Diâmetro do pino	5 mm
Face do pino	Plana
Assentamento do pino	Lixas 220, 400 e 600
Raio da trilha de deslizamento	25 mm
Rugosidade inicial dos discos	Sa 0,29 mm
Temperatura ambiente	22°C
Umidade relativa do ar	39-43 %

Adaptado de (DHOKEY; RANE, 2011)

Antes dos ensaios, os pinos foram lixados em lixas de carbeto de silício de granulometrias de #180, #400 e #600 com carga normal de 5 N (procedimento de assentamento dos pinos). Entre uma granulometria de lixa e outra, o pino foi limpo com álcool e seco com ar comprimido e, após a última etapa de assentamento, o pino foi limpo em cuba ultrassônica contendo álcool etílico por 20 minutos. Após o assentamento dos pinos e limpeza de pinos e discos (par tribológico), os discos de aço foram desmagnetizados e os pinos e discos foram pesados em balança analítica Mettler Toledo modelo XP205 (precisão de 0,0001 g), cinco medições para cálculo de média e desvio padrão.

Os ensaios tribológicos do tipo pino-disco foram realizados conforme norma ASTM G99 (ASTM, 2011) com duração de 3600 segundos. Ao final de cada ensaio, coletaram-se os debris em saco plástico para posterior caracterização. Cada um dos pares tribológicos foi limpo, seco e pesado novamente (seguindo o mesmo procedimento descrito no pré-ensaio) e as amostras foram armazenadas em dessecadores contendo sílica gel para análise pós-ensaio. A aquisição de dados dos ensaios tribológicos feita com frequência

de 100Hz e a sua extração foi feita em arquivos de texto, que foram processados para serem gerados os gráficos de evolução do coeficiente de atrito no software *Origin* versão 8.5.

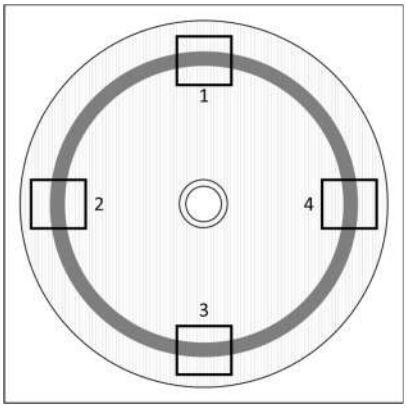
4.2.2. Caracterização dos corpos de prova após os ensaios tribológicos

Após cada um dos ensaios, o par tribológico foi analisado por interferometria óptica 3D e microscopia eletrônica de varredura para analisar os efeitos do desgaste nas superfícies tribológicas.

4.2.2.1. Análise topográfica quantitativa das tribosuperfícies dos discos por técnica de interferometria óptica 3D

Na análise por interferometria óptica da superfície dos discos, quatro regiões da trilha de desgaste foram analisadas (uma análise a cada 90° da trilha), vide Figura 17. A medição foi realizada pelo Método de *Stitching* (onde as medições de cinco áreas são realizadas para compor um resultado único) em cada região. Cada medição, com uma área de 1,4 por 7,0 mm, foi realizada sobre a trilha do disco.

Figura 17 - Representação esquemática das regiões do disco analisadas.



4.2.2.2. Análise microestrutural e mapeamento de composição química das superfícies dos discos após ensaio tribológico

Após os ensaios tribológicos, as superfícies foram analisadas utilizando MEV usando imagem de elétrons secundários (contraste topográfico, IES), imagem de elétrons retroespalhados (contraste de composição química – IER) e de espectrometria de energia dispersiva de raios X (microanálise química EDS). As microanálises químicas para o mapeamento de composição química foram feitas com tensão de aceleração de 20kV, tempo de aquisição de 30 minutos, distância de trabalho de 10 mm e *dead time* de 20%.

4.2.2.3. Análise microestrutural e mapeamento de composição química das secções transversais dos discos após ensaio tribológico

Os discos ensaiados foram cuidadosamente cortados em máquina de corte Struers, para manutenção do tribofilme, embutidos com resina condutora *Aka-Resin Phenolic SEM*, lixados, polidos e atacados com solução de Nital 5% por 30 segundos. A secção transversal dos discos foi analisada no MEV para caracterização do tribofilme e identificação de camada deformada plasticamente. Desta maneira, foram feitas imagens de elétrons retroespalhados (IER) e imagens de mapas de composição química dos elementos ferro, cobre, oxigênio, alumínio, zinco e chumbo usando microanálise EDS com tensão aceleradora de 20kV, distância de trabalho de 10 mm, *dead time* de 20% e tempo de aquisição de 30 minutos.

4.3. Tratamento de dados experimentais

Os valores de dureza medidos dos materiais dos pinos e dos discos foram comparados com os especificados pelas normas e apresentados no software CES *EduPack* 2018 nível 3 para se verificar se estavam dentro das especificações e adequados para o que foi definido para os ensaios.

Os ensaios tribológicos do tipo pino-disco foram realizados no tribômetro Bruker configurado para aquisição de dados no software UMT, com uma frequência de 100Hz, e foram extraídos no software *TriboTest* em arquivos de texto com um filtro médio a cada cem pontos, fazendo com que os gráficos plotados no software *Origin* 8.5 tivessem 1 ponto por segundo. Os gráficos de coeficiente de atrito foram plotados em função do tempo para cada triplicada de material, com a evolução do coeficiente de atrito médio de cada triplicata em função da carga normal aplicada para cada material e um gráfico de coeficiente de atrito em função do tempo para cada carga normal comparando os três materiais. Os valores de coeficiente de atrito médio e seus respectivos desvios padrão foram calculados no próprio software, se desconsiderando os primeiros 500 segundos de ensaio, pois este intervalo do ensaio apresentou grande instabilidade.

As superfícies dos discos foram analisadas quantitativamente por interferometria óptica 3D antes e depois do ensaio para se registrar as condições iniciais das superfícies do par tribológico e para verificar os danos causados pelo ensaio nas superfícies. Foram registrados os perfis 2D e 3D dos discos antes e depois do ensaio, e foi plotado um gráfico evolução da rugosidade Sa em função da carga normal aplicada.

Os resultados de caracterização topográfica e microestrutural dos discos realizadas após os ensaios tribológicos foram comparadas entre si.

5. RESULTADOS

5.1. Condição inicial

Nas tabelas 3 a 6 são apresentadas as composições químicas nominais dos materiais especificados pelas normas EN, ASTM e AISI. Adicionalmente, algumas composições químicas, como as do aço e Al foram medidas por microanálise EDS. O disco de aço AISI 4140 apresentou teor de manganês acima do especificado. Os pinos de cobre C10200 e latão C36000 apresentaram em seus certificados de qualidade composições químicas dentro da faixa especificadas nas normas EN CW008A e EN CW603N, respectivamente. O pino de alumínio 6082-T6 apresentou teor de silício um pouco acima do especificado pela norma EN AW-6082.

Tabela 3 - Composição química do disco de aço AISI 4140

AISI 4140	Fe (%)	Si (%)	Mn (%)	S (%)	Cr (%)	Mo (%)
Nominal	96,8 - 97,8	0,15 - 0,35	0,75 - 1	0 - 0,04	0,8 - 1,1	0,15 - 0,25
EDS	97,2	0,2	1,4	0,1	1,1	0,1

Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

Tabela 4 - Composição química do pino de cobre C10200

C10200	Cu (%)
Nominal	100
Certificado do C.Q.	100

Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

Tabela 5 - Composição do pino de latão C36000

C36000	Cu (%)	Zn (%)	Pb (%)	Fe (%)	Sn (%)	Ni (%)
Nominal	60,0 – 63,0	Dif.	2,5 – 3,0	0 – 0,35	-	-
Certificado do C.Q	60,6	Dif.	2,7	0,3	0,1	0,0

Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

Tabela 6 - Composição do pino de alumínio 6082-T6

6082-T6	Al (%)	Si (%)	Mg (%)	Mn (%)	Fe (%)
Especificado	97	0,7 – 1,3	0,6 – 1,2	0,4 – 1,0	0 – 0,5
EDS	95,6	1,7	0,9	0,7	-

Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

A Tabela 7 apresenta os valores de dureza Vickers segundo especificações e os valores experimentais. O pino de cobre e de alumínio apresentaram valores de dureza dentro das especificações EN CW008A e EN AW-6082-T6, respectivamente. O disco de aço apresentou dureza aproximadamente 24 HV abaixo da especificação EM 42CrMo4, enquanto o pino de latão C36000 apresentou dureza 9 HV abaixo do especificado pela norma EN CW603N. No entanto, todos os pinos apresentaram valores de dureza dentro da faixa desejada, entre 90 e 110 HV, como descrito em Materiais e Métodos.

Tabela 7 - Dureza Vickers especificada e medida dos materiais

	Aço AISI 4140	**Cobre C10200 duro**	**Latão C36000 duro**	**Alumínio 6082-T6**
Especificado	183 - 223	80 - 115	105 - 140	95 - 105
Medido	159 ± 2 HV30	101 ± 2 HV10	96 ± 3 HV10	104 ± 3 HV10

Fonte: Granta CES Edupack 2018, nível 3.

A Figura 18 mostra a microestrutura do disco de aço AISI 4140 revelando a presença de colônias de perlita e grãos equiaxiais de ferrita.

As Figura 19 (a) e (b) mostram a microestrutura do pino de cobre C10200, mostrando grãos equiaxiais de fase alfa com presença de inclusões equiaxiais de óxido de cobre (microanálises EDS indicam teores entre 0,2 e 0,4% de oxigênio).

As Figura 20 (a) e (b) mostram a microestrutura alongada do pino de latão C36000, que é composta de fase beta, CCC, precipitada intergranularmente (microanálise EDS indicou teores de cobre de 56,9%, zinco de 43,0% e chumbo de 0,2%) em matriz de fase alfa, CFC (microanálise EDS indicou cobre de 67,2%, zinco de 33,2% e chumbo de 0,2%) precipitados alongados de chumbo, CCC (vide regiões brancas, microanálise EDS indicou aproximadamente 14,1% de cobre, 9,0% de zinco e 76,8% de chumbo).

As Figura 21 (a) e (b) mostram a microestrutura do pino de liga de alumínio 6082-T6, composta de matriz de fase alfa com precipitação de fases intermetálicas contendo alumínio, ferro, silício, magnésio e manganês.

Figura 18 - Microestrutura inicial do disco de aço AISI 4140, composta de colônias de perlita e grão equiaxiais de ferrita. IES-MEV. 500X. Ataque: Nital 5% por 30 segundos.

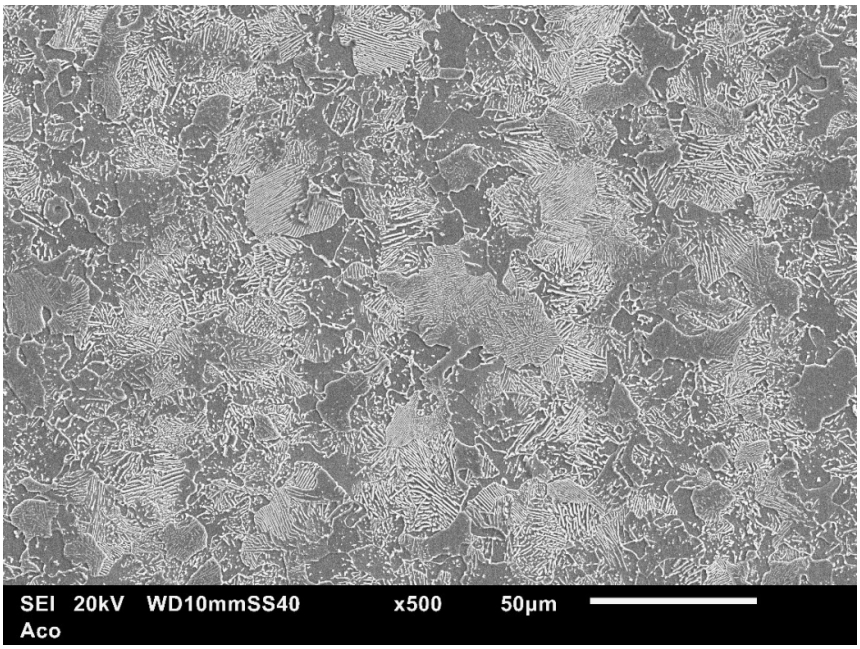
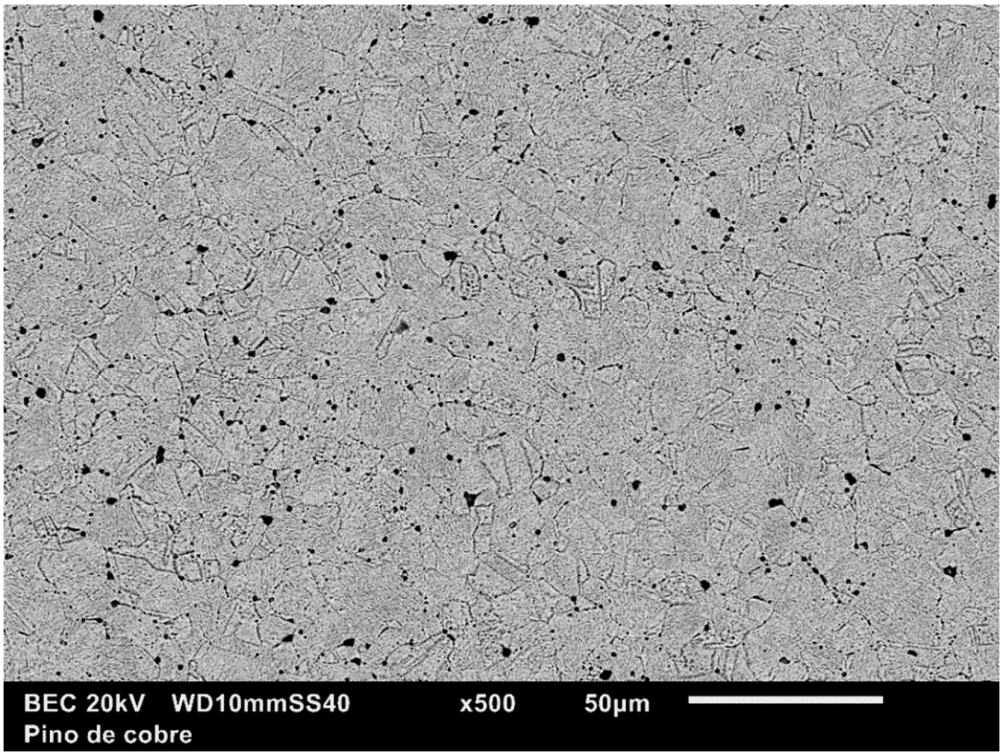
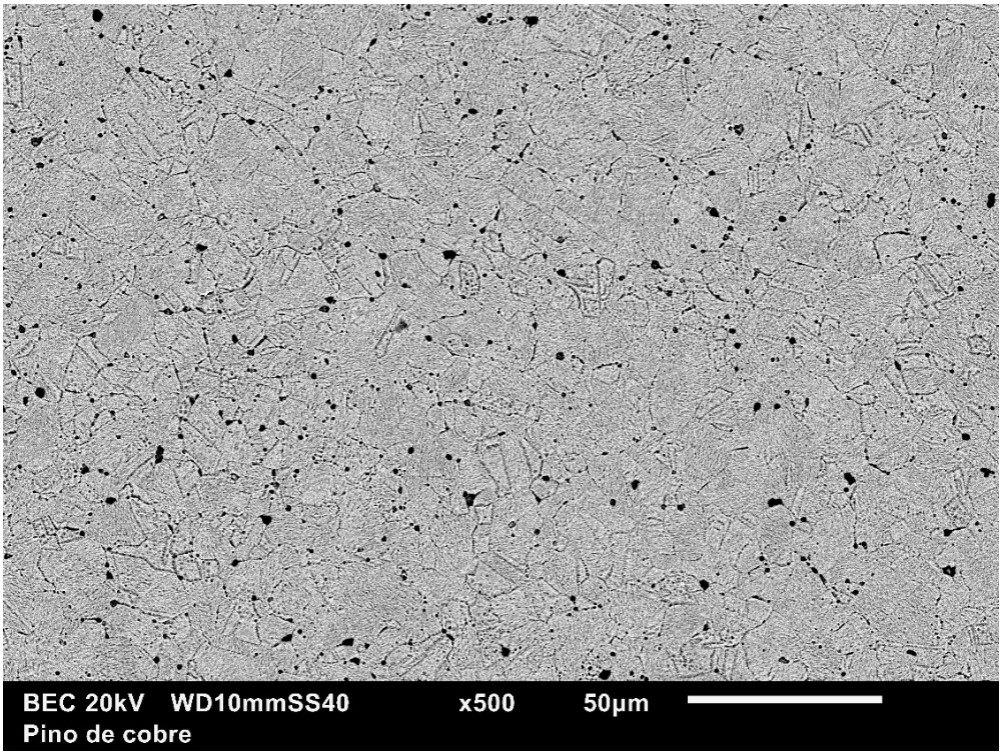


Figura 19 - Microestrutura inicial do pino de cobre C10200. Grãos equiaxiais de fase alfa com a presença de maclas de deformação plástica e precipitação de óxido de cobre (pontos escuros). (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. IER-MEV; 500X. Ataque: Cloreto férrico hexa hidratado (9,1g) com 30 ml de HCl concentrado e 100ml de água destilada por 30 segundos.

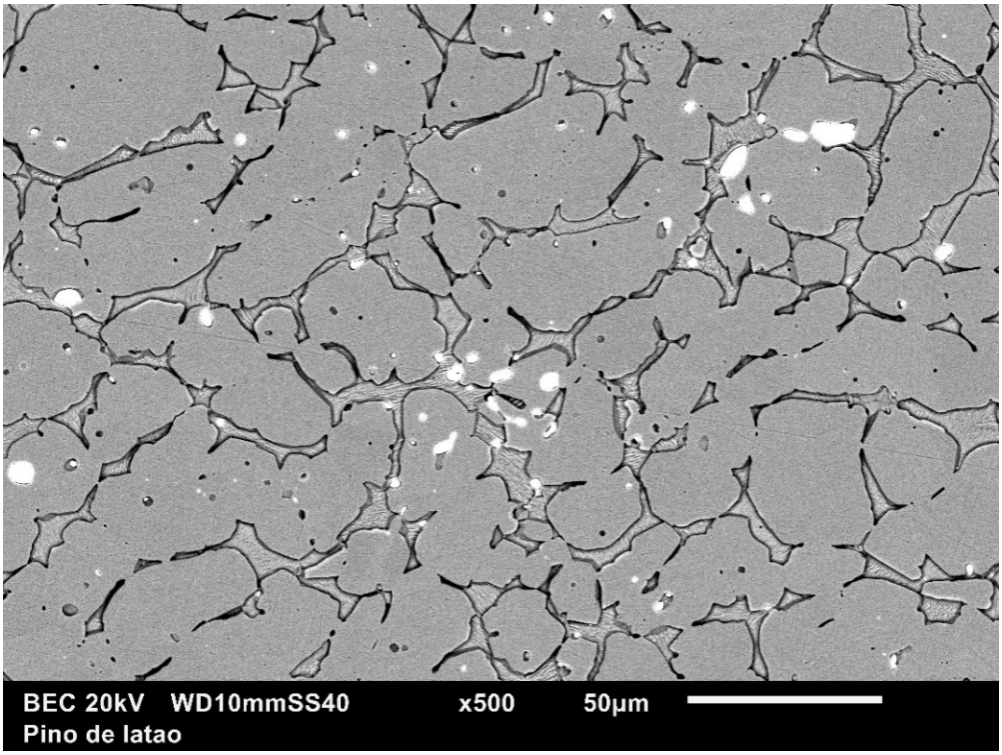


(a)

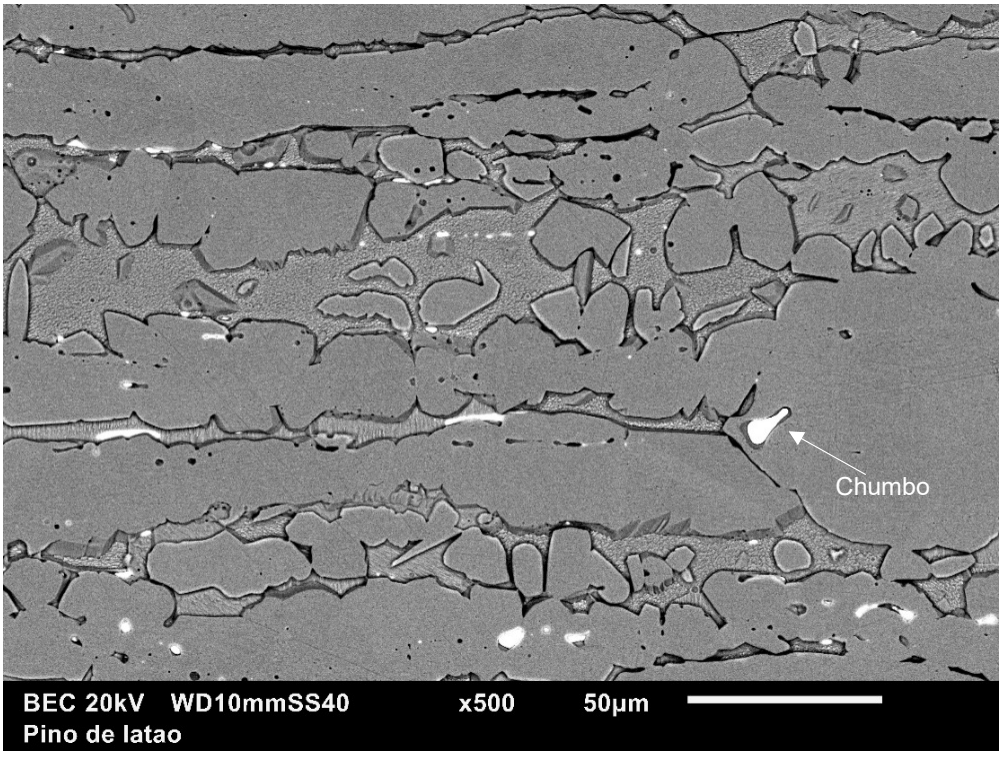


(b)

Figura 20 - Microestrutura inicial do pino de latão C36000. Matriz de fase alfa e precipitados de fase beta e varetas de chumbo (área branca). (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. IER-MEV; 500X. Ataque: Cloreto férrico hexa hidratado (9,1g) com 30 ml de HCl concentrado e 100ml de água destilada por 30 segundos.

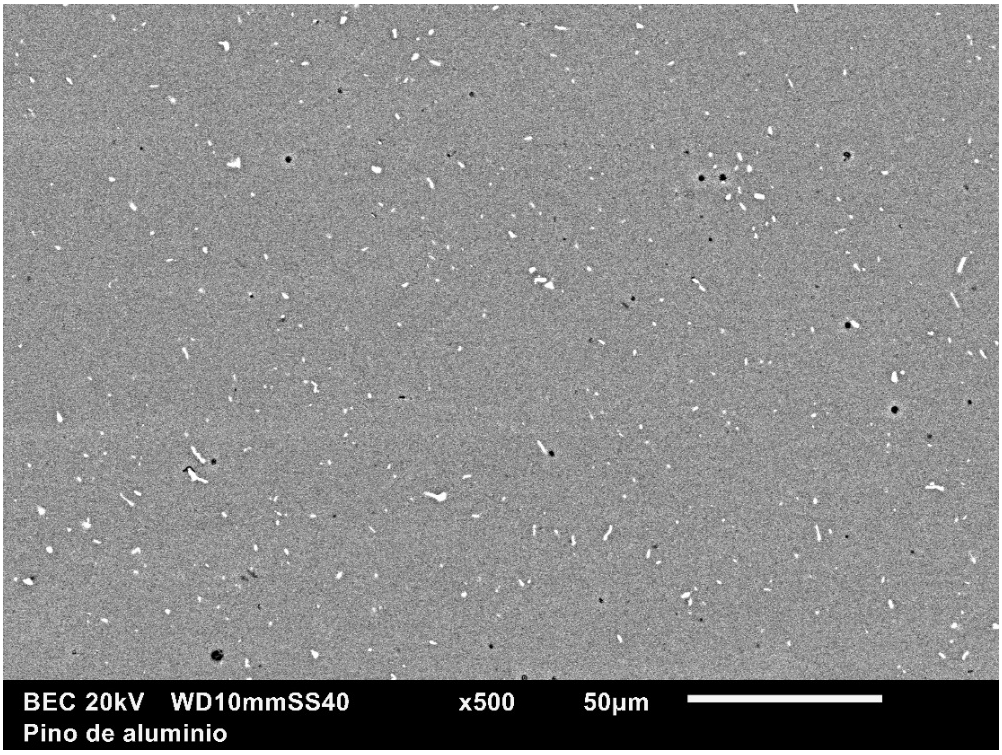


(a)

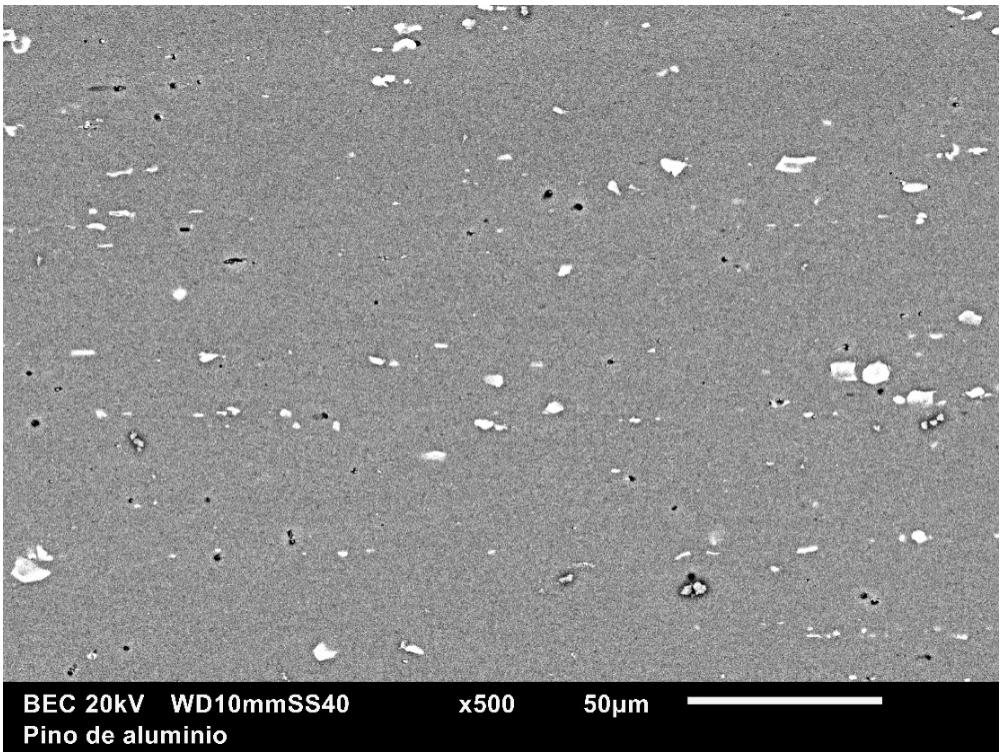


(b)

Figura 21 - Microestrutura inicial do pino de liga alumínio 6082-T6. (a) Seção transversal; (b) Seção longitudinal. Microestrutura composta de grãos de fase alfa e precipitados intermetálicos lamelares contendo Al, Fe, Si, Mg e Mn. IER-MEV; 500X. Ataque: hidróxido de sódio 10%.



(a)



(b)

5.2. Evolução do coeficiente de atrito

A Figura 22 apresenta a evolução do coeficiente médio de atrito com o aumento da carga normal para os três pares tribológicos investigados, enquanto a Tabela 8 traz um sumário desses resultados. Verifica-se que os ensaios realizados com pinos de cobre apresentaram o maior valor médio do coeficiente de atrito, variando entre 0,67 (10 N de carga normal) e 0,66 (50 N de carga normal). Nos ensaios com pinos de alumínio, o valor médio do coeficiente de atrito oscilou entre 0,45 (10 N de carga normal) e 0,42 (50 N de carga normal). Por fim, os ensaios realizados com pinos de latão apresentaram o menor valor médio do coeficiente de atrito, oscilando entre 0,32 (carga normal de 10 N) e 0,27 (50 N de carga normal). Não foi notado nenhum efeito do aumento da carga normal nos valores de coeficiente de atrito. Nota-se que nos ensaios com os pinos de cobre o desvio padrão foi próximo de 0,1, enquanto que nos ensaios com pinos de alumínio e latão o desvio padrão ficou entre 0,02 e 0,04, sugerindo que houve maior oscilação do coeficiente de atrito ao longo do tempo nos ensaios com pinos de cobre, vide Figura 22.

Figura 22 - Evolução do coeficiente de atrito médio com o aumento da carga normal para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco.

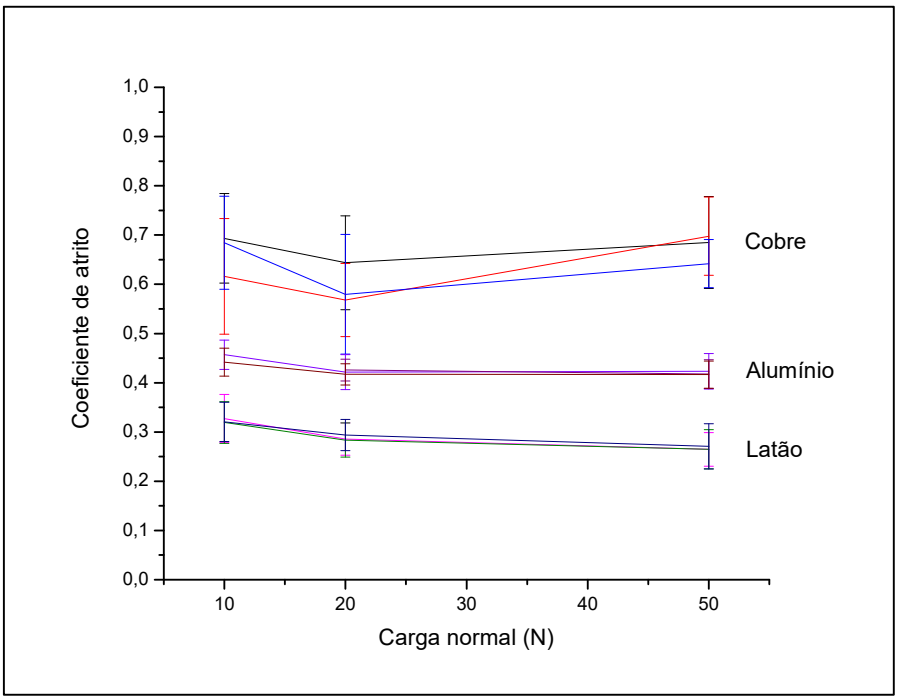


Tabela 8 - Valores de coeficiente de atrito médio e desvio padrão.

		Par alumínio-aço		Par cobre-aço		Par latão-aço	
		Coeficiente de atrito médio	**Desvio padrão**	**Coeficiente de atrito médio**	**Desvio padrão**	**Coeficiente de atrito médio**	**Desvio padrão**
	1	0,46	0,03	0,69	0,09	0,33	0,05
10 N	2	-	-	0,62	0,12	0,32	0,04
	3	0,44	0,03	0,68	0,09	0,32	0,04
	1	0,42	0,04	0,64	0,10	0,29	0,03
20 N	2	0,43	0,02	0,57	0,07	0,28	0,03
	3	0,42	0,02	0,58	0,12	0,29	0,03
	1	0,42	0,04	0,68	0,09	0,26	0,03
50 N	2	0,42	0,03	0,70	0,08	0,26	0,04
	3	0,42	0,03	0,64	0,05	0,27	0,05

Nas Figura 23 a Figura 25 são apresentadas as curvas características de evolução do coeficiente de atrito para os diferentes pinos testados contra disco de aço e cargas normais. Nota-se que a evolução do coeficiente de atrito médio foi mais estável para o par com pinos de latão, seguido de perto do par usando pinos de alumínio. Comparativamente, o par com pinos de cobre apresentou comportamento mais instável em relação à evolução do coeficiente de atrito para todos os valores de carga normal investigados.

Figura 23 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 10 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco.

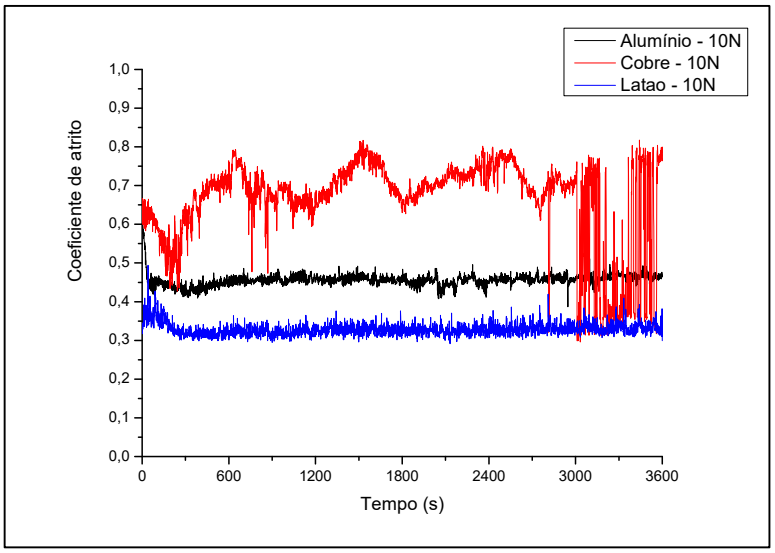


Figura 24 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 20 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco.

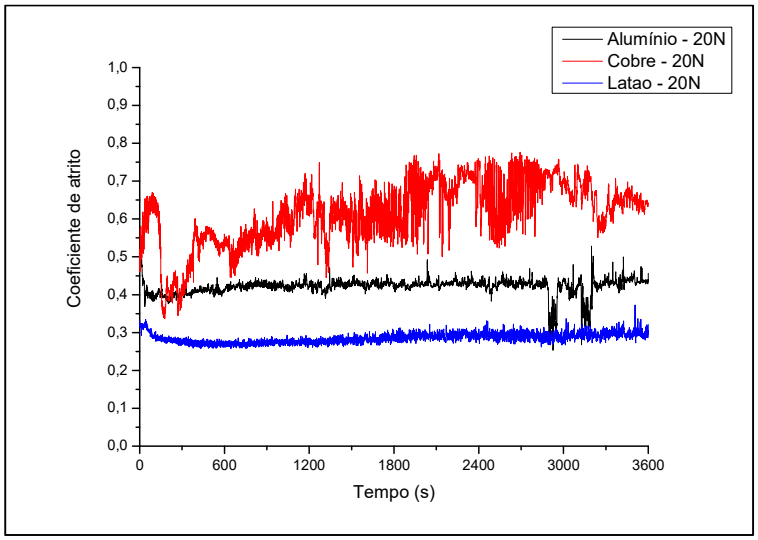
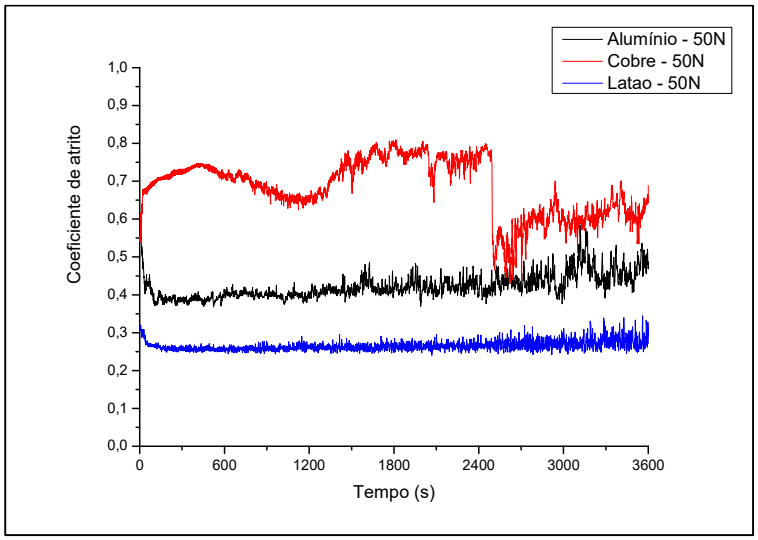


Figura 25 - Evolução do coeficiente de atrito médio com carga normal de 50 N para os pares tribológicos cobre-aço, alumínio-aço e latão-aço no ensaio pino-disco.



5.3. Perda de massa dos discos e pinos

As Figura 26 e Figura 27 apresentam as perdas de massa dos discos e pinos metálicos, respectivamente. Nota-se que nos ensaios com pinos de latão houve adesão crescente de material do pino no disco em função da carga normal em todos os ensaios. Nos ensaios com os pinos de alumínio e de cobre houve predominantemente adesão de material dos pinos nos discos com carga normal de 10 N (0,5 MPa). Para as cargas de 20 (1 MPa) e 50 N (2,5 MPa) houve,

contudo, perda de massa crescente dos discos e o pino de cobre provocou maior perda de massa do disco que o pino de alumínio. Por sua vez, nota-se que todos os pinos perderam massa, porém a perda de massa dos pinos de latão foi consideravelmente superior às dos pinos de alumínio e cobre, que apresentaram o mesmo valor de perda de massa (vide Figura 27).

Figura 26 - Perda de massa dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco.

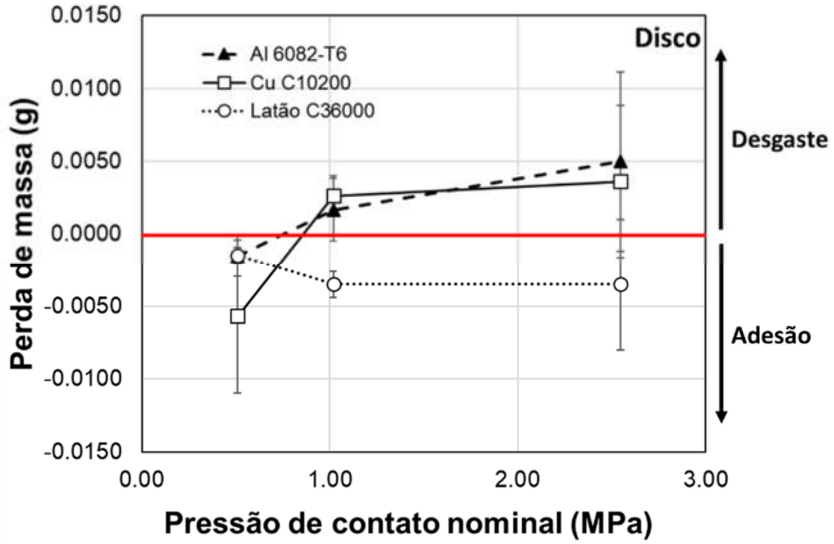
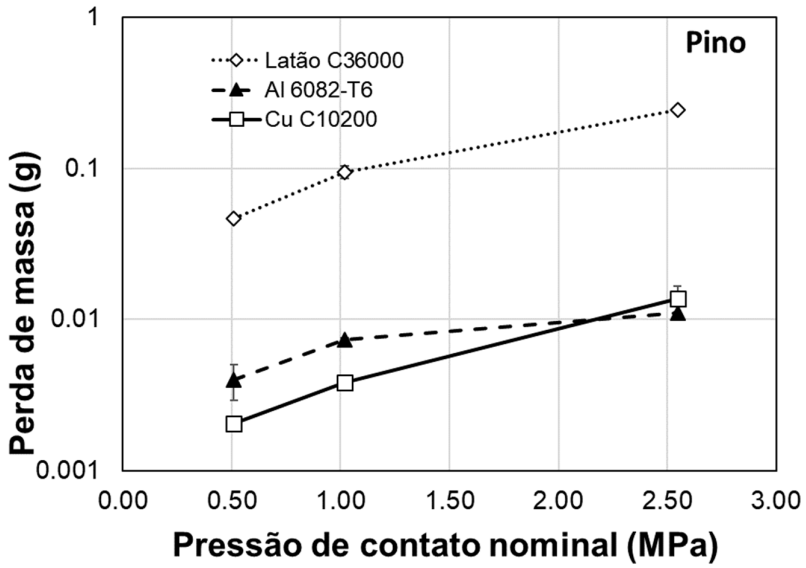


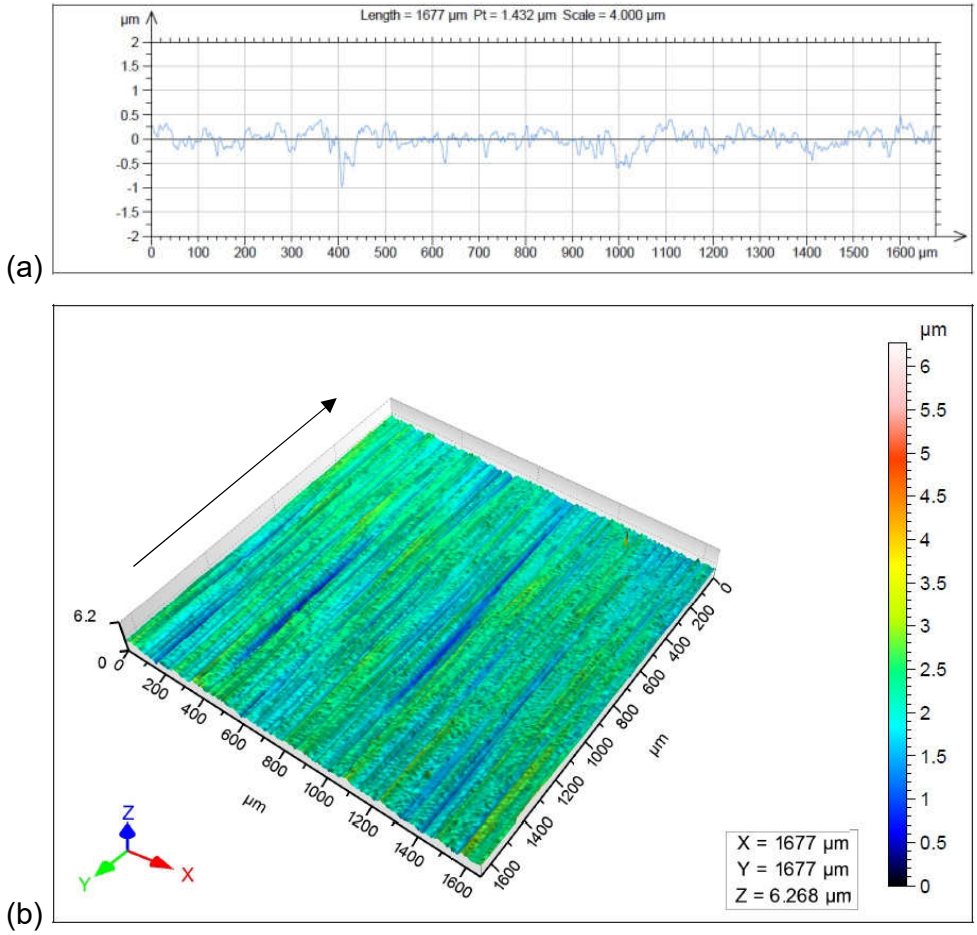
Figura 27 - Perda de massa dos pinos de alumínio, cobre e latão após os ensaios pino-disco.



5.4. Análise topográfica das superfícies dos discos e pinos

As Figura 28 (a) e (b) mostram a condição inicial das superfícies dos discos e o valor médio de rugosidade Sa medido foi de 0,26 ± 0,09 μm. Na Figura 28 (b) notam-se as linhas de retífica ao longo do eixo Y (vide seta).

Figura 28 - Condição inicial de rugosidade dos discos de aço 4140. (a) Perfil 2D; (b) Perfil 3D.



As Figura 29, Figura 30 e Figura 31 mostram a topografia 3D por interferometria óptica das trilhas de desgaste dos discos e as Figura 32, Figura 33 e Figura 34 mostram a topografia 3D por interferometria óptica das superfícies dos pinos de alumínio, cobre e latão após os ensaios pino-disco com as cargas normais de 10, 20 e 50N.

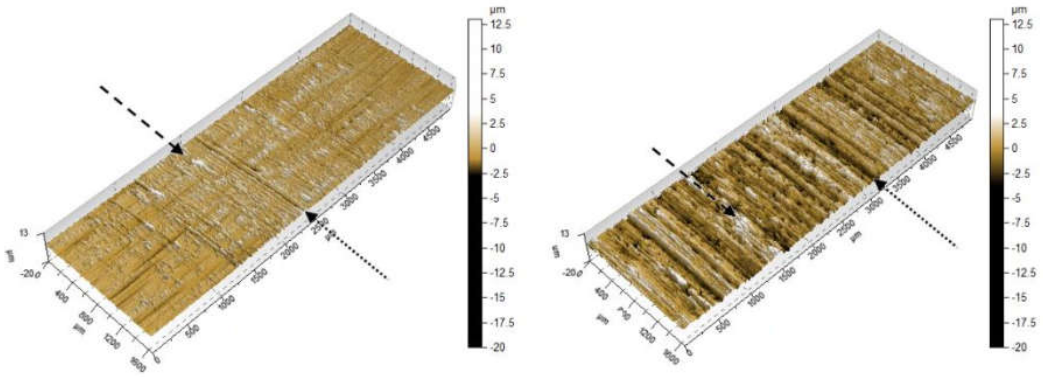
Na Figura 29, nota-se que nos ensaios com os pinos de alumínio houve adesão de material do pino nos ensaios com carga normal de 10 N e adesão de material do pino e abrasão do disco com as carga de 50 N. A abrasão do disco foi mais acentuada para a carga de 50 N, evidenciada qualitativamente pela maior presença de sulcos.

Na Figura 30, nota-se que nos ensaios com os pinos de cobre houve adesão de material do pino e remoção de material do disco com 10 N de carga normal, enquanto que para a carga de 50 N observou-se remoção mais intensa de material do disco (provavelmente por mecanismo de *galling*, vide setas com linhas pontilhadas), além de uma adesão mais acentuada de material do pino.

Na Figura 31, finalmente, observa-se que nos ensaios com os pinos de latão ocorreu apenas adesão de material do pino nas superfícies dos discos, que foi crescente com o aumento da carga normal.

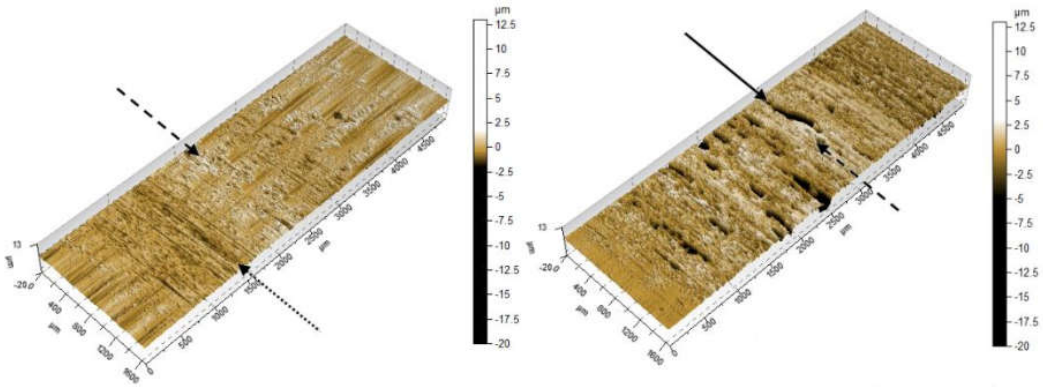
Nas Figura 32 a Figura 34 observa-se que nos pinos de alumínio e de latão houve apenas abrasão para todas as cargas normais aplicadas, porém nos pinos de cobre houve abrasão e oxidação dos pinos nos ensaios com cargas de 10 e 20 N e oxidação mais intensa da superfície do pino para carga normal de 50 N.

Figura 29 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de alumínio com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b).



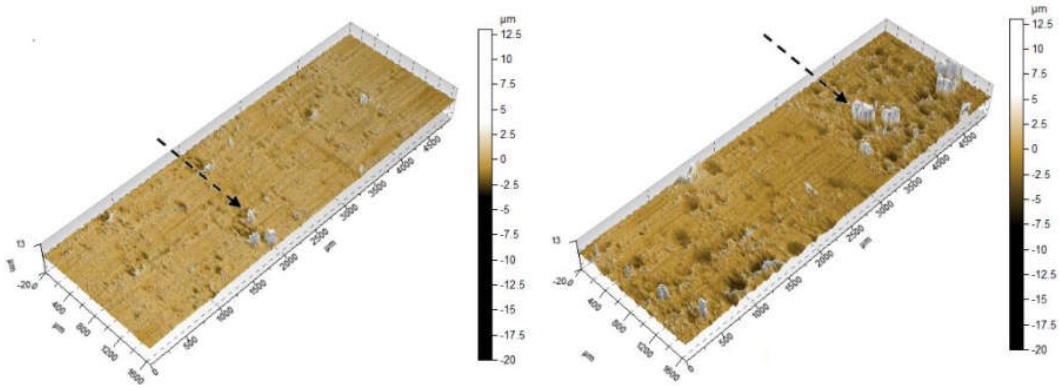
(a) (b)

Figura 30 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de cobre com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b).



(a) (b)

Figura 31 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos discos de aço 4140 após os ensaios pino-disco contra pinos de latão com cargas normais de 10 (a) e 50 N (b).



(a) (b)

Figura 32 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos pinos de alumínio após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N.

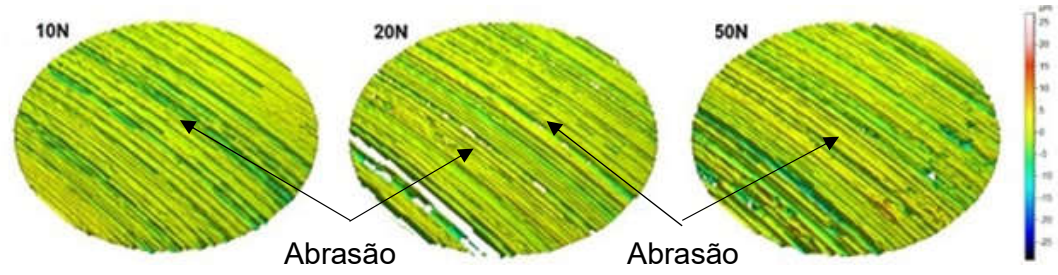


Figura 33 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos pinos cobre após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N.

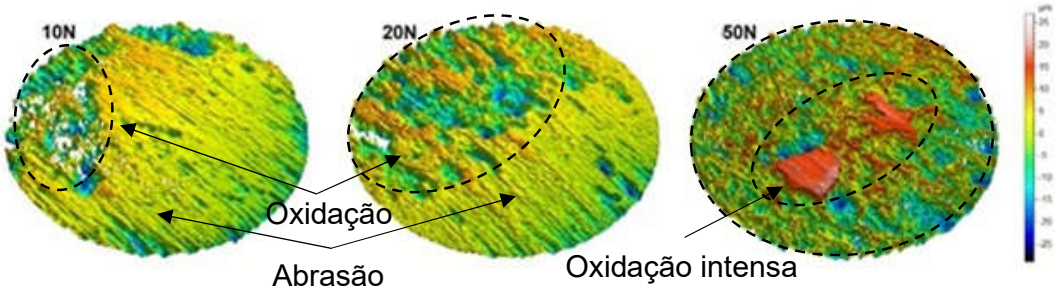
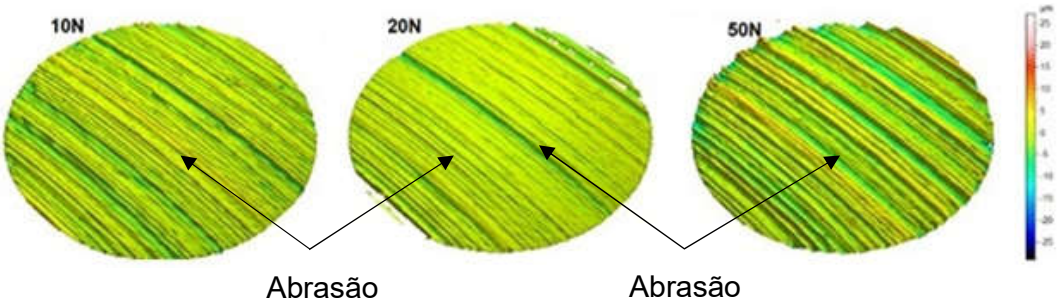


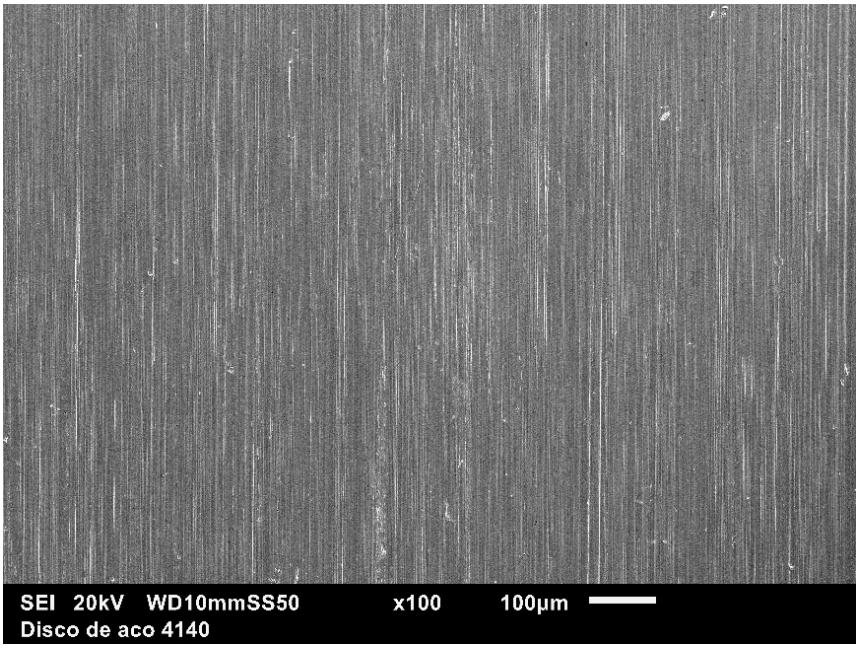
Figura 34 - Perfis 3D obtidos por interferometria óptica das superfícies dos pinos de latão após os ensaios pino-disco com cargas normais de 10, 20 e 50 N.



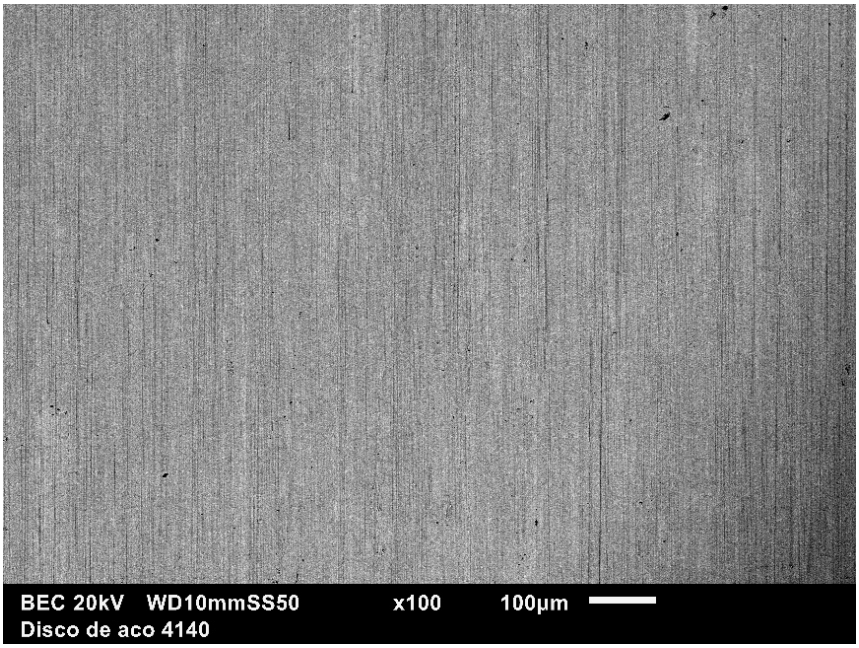
5.5. Caracterização topográfica dos discos de aço

As Figura 35 (a) e (b) mostram a condição inicial das superfícies dos discos de aço 4140 antes do ensaio tribológico do tipo pino-disco, com aumento de 100X.

Figura 35 - Condição inicial da superfície do disco de aço AISI 4140 com aumento de 100X: (a) Detalhe topográfico da superfície do disco, IES, MEV; (b) Contraste de composição química na mesma área, IER, MEV.



(a)



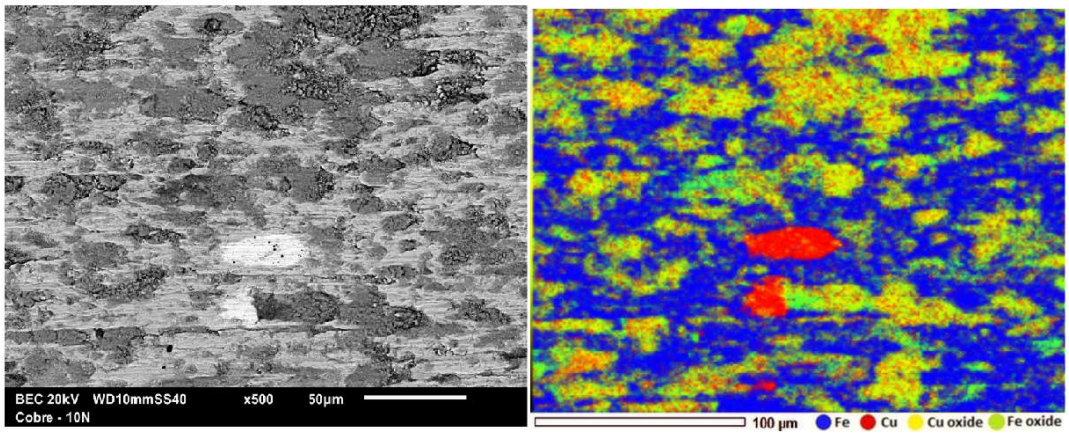
(b)

Nos ensaios com pinos de cobre ocorreu a formação de ilhas de óxido de cobre e adesão de cobre metálico para todas as cargas aplicadas, e adicionalmente nos ensaios com carga normal de 50 N houve destacamento de material do disco. Nas Figura 36 (a) e Figura 37 (a) nota-se a superfície do disco em cinza claro, ilhas de óxido de cobre em cinza escuro e as ilhas de adesão de cobre metálico em branco na superfície, o que é confirmado pelos mapas de composição química Figura 36 (b) e Figura 37 (b), que mostram algumas regiões ricas em cobre coincidindo com as regiões ricas em oxigênio. Verifica-se que o aumento da carga normal tende a aumentar as áreas de adesão de cobre metálico, assim como as áreas de óxidos metálicos.

Nos ensaios com pinos de alumínio ocorreu a formação de ilhas de óxido de alumínio para todas as cargas aplicadas. Nas Figura 38 (a) e Figura 39 (a) nota-se a superfície do disco em cinza claro e ilhas de óxido de alumínio em cinza escuro na superfície, o que é confirmado pelos mapas de composição química das Figura 38 (b) e Figura 39 (b), que mostram as regiões ricas em alumínio coincidindo com as regiões ricas em oxigênio. Verifica-se que o aumento da carga normal tende a deixar as ilhas de óxido mais concentradas, o que pode ser explicado pela maior remoção de material do disco por abrasão, conforme foi visto anteriormente na análise topográfica por interferometria óptica.

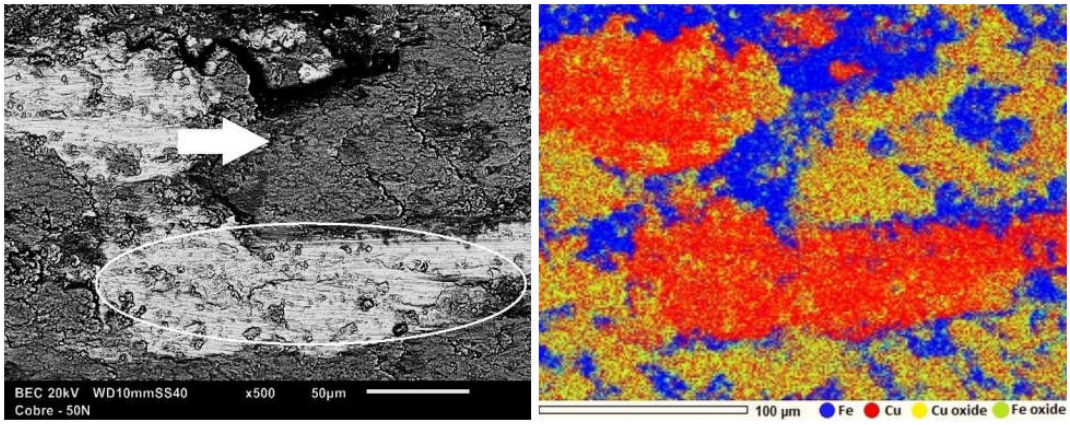
Nos ensaios com pinos de latão ocorreu adesão de cobre e zinco, oxidação da superfície e presença de chumbo para todas as cargas aplicadas, com aumento da área de adesão do material do pino com o aumento da carga normal. Nas Figura 40 (a) e Figura 41 (a) nota-se a superfície do disco em cinza claro e ilhas de adesão do material do pino na superfície, o que é confirmado pelos mapas de composição química das Figura 40 (b) e Figura 41 (b), que mostram as regiões ricas em cobre coincidindo com as regiões ricas em zinco, oxigênio distribuído sobre a área analisada, tendendo a se concentrar nas áreas de adesão do pino e a presença de chumbo se concentrando nas ilhas de adesão do pino.

Figura 36 – Superfície do disco ensaiado contra pino de cobre com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



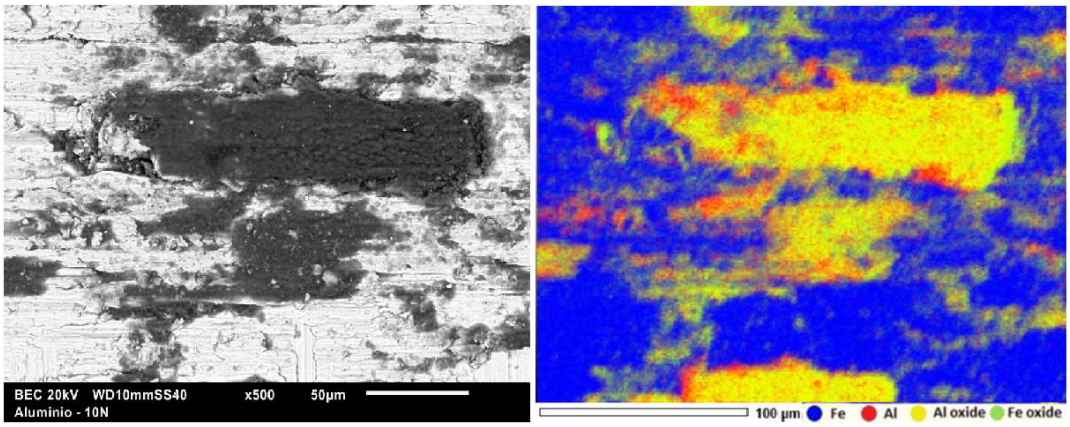
(a) (b)

Figura 37 - Superfície do disco ensaiado contra pino de cobre com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



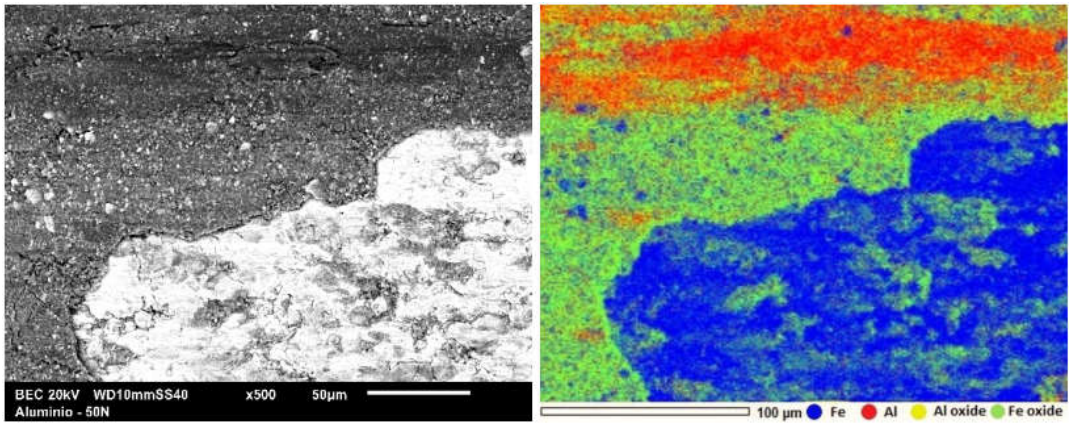
(a) (b)

Figura 38 - Superfície do disco ensaiado contra pino de alumínio com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



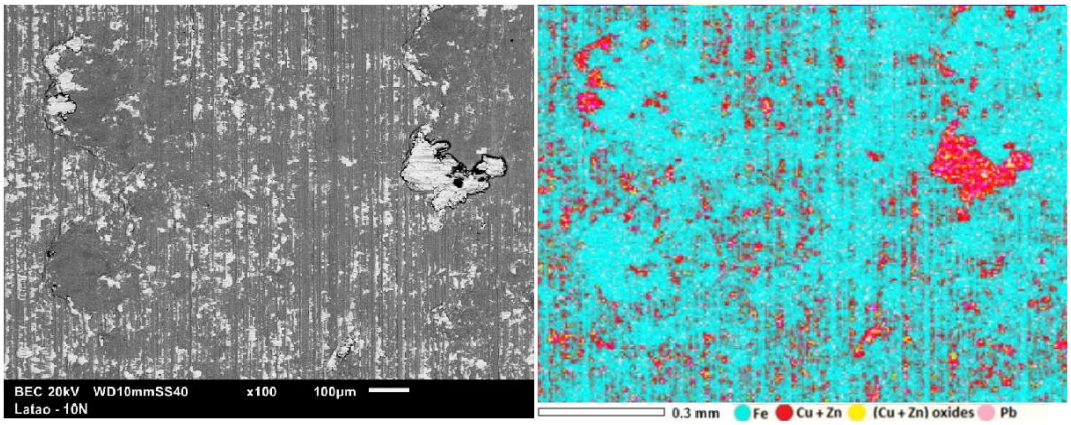
(a) (b)

Figura 39 - Superfície do disco ensaiado contra pino de alumínio com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



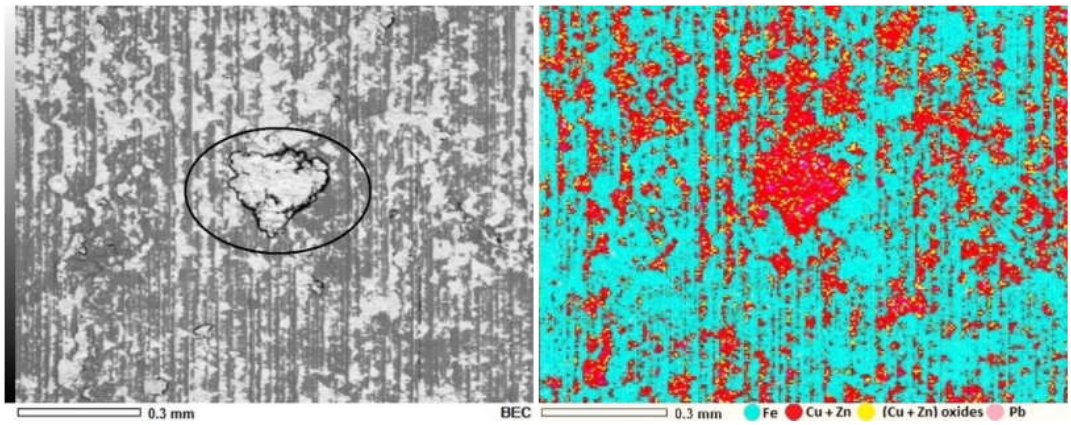
(a) (b)

Figura 40 - Superfície do disco ensaiado contra pino de latão com carga de 10 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



(a) (b)

Figura 41 - Superfície do disco ensaiado contra pino de latão com carga de 50 N: (a) Imagem da superfície do disco em contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



(a) (b)

5.6. Caracterização microestrutural da seção transversal dos discos de aço após ensaios tribológicos

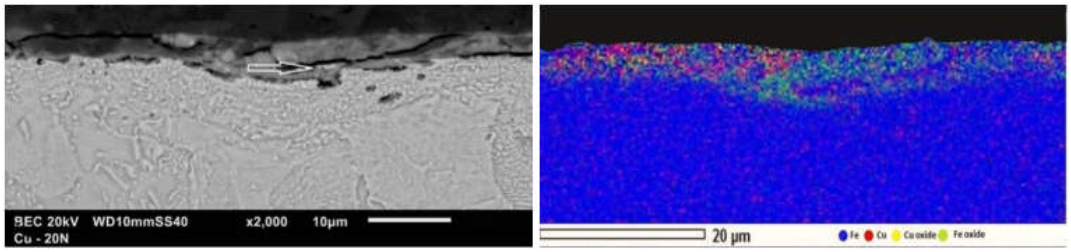
Na análise da seção transversal do disco ensaiado contra pino de cobre com 20 N de carga normal nota-se a formação de um tribofilme composto de cobre e oxigênio, assim como encruamento subsuperficial, vide

Figura 42. Verifica-se a presença de cobre metálico localizado em regiões específicas e de óxidos de ferro e de cobre.

Na análise da seção transversal do disco ensaiado contra pino de alumínio com 20 N de carga normal nota-se também a formação de tribofilme, assim como encruamento subsuperficial, vide Figura 43. Verifica-se também forte correlação entre as áreas de alumínio e de oxigênio, assim como uma mistura do material do pino com o material do disco no tribofilme formado.

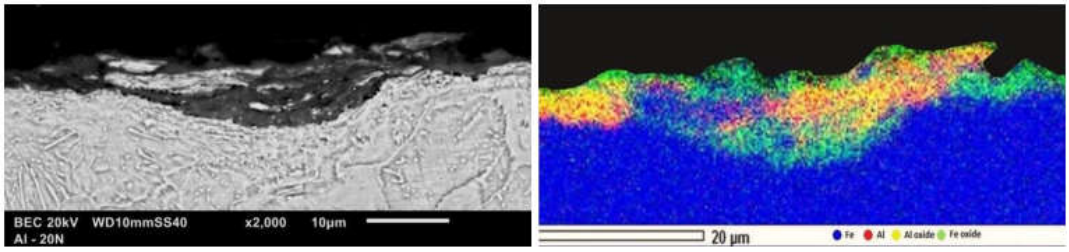
Por fim, na análise da seção transversal do disco ensaiado contra pino de latão com 20 N de carga normal nota-se também a formação de tribofilme, porém não foi possível visualizar encruamento subsuperficial, vide Figura 44. A análise da seção transversal também mostra a presença de oxigênio, que como já foi dito anteriormente, que pode ser um dos causadores do baixo coeficiente de atrito dos ensaios realizados com pinos de latão, juntamente com a presença de chumbo na superfície.

Figura 42 - Seção transversal do disco de aço ensaiado contra pino de cobre com carga de 20 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



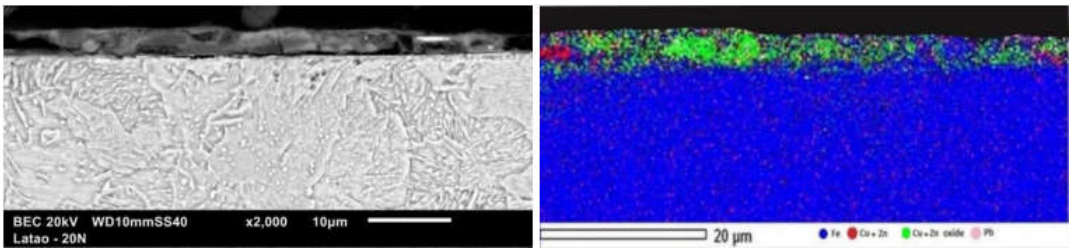
(a) (b)

Figura 43 - Seção transversal do disco de aço ensaiado contra pino de alumínio com carga de 20 N. (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



(a) (b)

Figura 44 - Seção transversal do disco de aço ensaiado contra pino de latão com carga de 20 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de composição química, EDS, MEV.



(a) (b)

Nos ensaios com pinos de cobre, ao se fazer uma análise combinada dos resultados de perda de massa, análise topográfica através de interferometria óptica 3D e caracterização superficial por MEV, é possível sugerir que houve adesão de material do pino e formação de óxidos na superfície, juntamente com remoção de material do disco devido à adesão de material ao pino.

Nos ensaios com pinos de alumínio verificou-se a formação de ilhas de óxido de alumínio com 10 N de carga normal e adesão de alumínio metálico com 50 N de carga normal.

Nos ensaios com pinos de latão verificou-se que houve apenas adesão de cobre e zinco metálico na superfície do disco, juntamente com chumbo e leve oxidação.

5.7. Caracterização microestrutural da seção transversal dos pinos após ensaios tribológicos

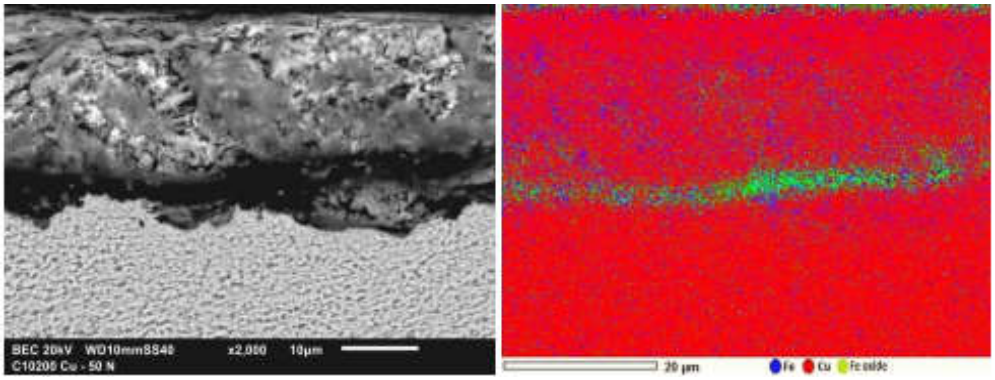
Na análise da seção transversal do pino de cobre ensaiado com 50 N de carga normal nota-se a formação de um tribofilme composto de cobre, ferro e

oxigênio, sugerindo a transferência de material do disco para a superfície do pino, vide Figura 45.

Por sua vez, a análise da seção transversal do pino de alumínio ensaiado com 50 N de carga normal mostra a formação de um tribofilme composto de alumínio, oxigênio e ferro, sugerindo a transferência de material do disco para a superfície do pino e a formação de tribofilme de óxidos de alumínio e de ferro, vide Figura 46.

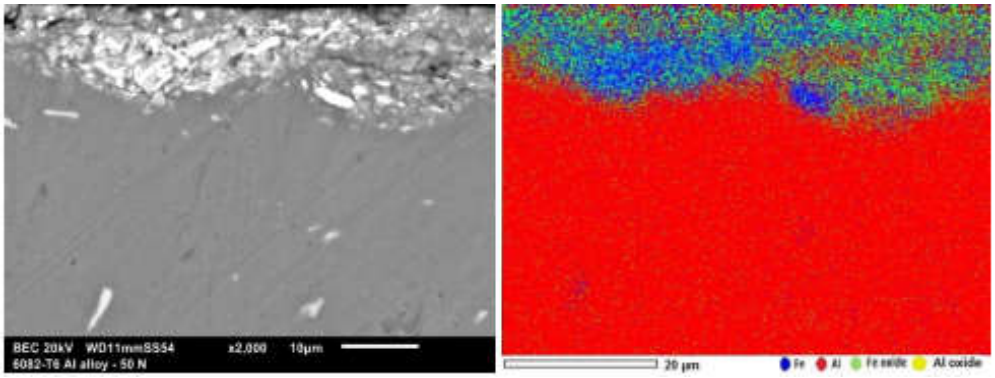
Por fim, a análise da seção transversal do pino de latão ensaiado com 50 N de carga normal mostra apenas a deformação da microestrutura no pino, não sendo possível identificar adesão de material do disco na superfície, vide Figura 47.

Figura 45 - Seção transversal do pino de cobre ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS.



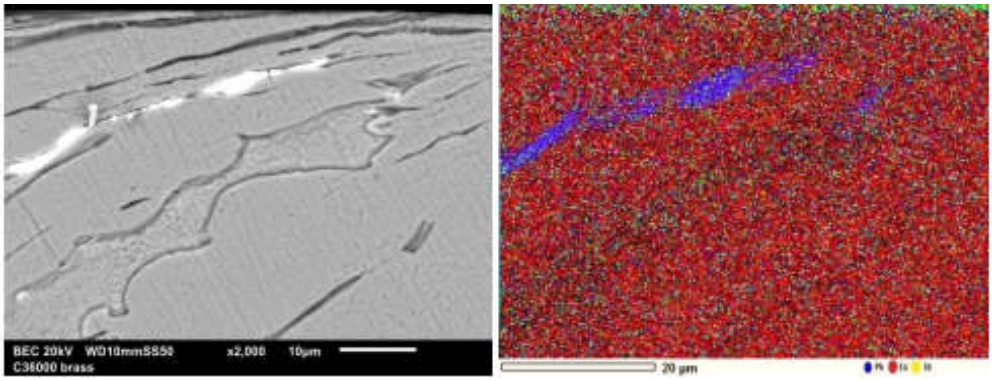
(a) (b)

Figura 46 - Seção transversal do pino de alumínio ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS.



(a) (b)

Figura 47 - Seção transversal do pino de latão ensaiado contra disco de aço com carga de 50 N: (a) Contraste de composição química, IER, MEV; (b) Mapeamento de EDS.



(a) (b)

5.8. Consolidação de resultados

A Tabela 9 concentra os principais resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 9 - Consolidação dos resultados.

Resultado	Par cobre-aço	Par alumínio-aço	Par latão-aço
Coeficiente de atrito médio	0,65	0,42	0,30
Evolução do coeficiente de atrito	Instável	Estável	Estável
Perda de massa do disco 10 N	-0,004 g	-0,002 g	-0,001 g
Perda de massa do disco 20 N	0,003 g	0,002 g	-0,002 g
Perda de massa do disco 50 N	0,012 g	0,004 g	-0,004 g
Perda de massa do pino 10 N	0,002 g	0,004 g	0,047 g
Perda de massa do pino 20 N	0,004 g	0,007 g	0,098 g
Perda de massa do pino 50 N	0,014 g	0,011 g	0,247 g
Caracterização topográfica (Interferometria óptica 3D)	Adesão, abrasão, *scuffing*, *galling*	Abrasão	Adesão
Caracterização superficial (Disco)	cobre metálico e óxidos de cobre e Fe	Óxido de Al	Latão, óxidos de cobre e zinco e chumbo
Seção transversal - Composição química do tribofilme (Disco)	Microscopicamente heterogênea	Microscopicamente heterogênea	Microscopicamente homogênea
Seção transversal - Camada deformada plasticamente (Disco)	Heterogênea, Profundidade máxima de 10 μm	Heterogênea, profundidade máxima de 10 μm	Ausente
Seção transversal - Composição química do tribofilme (Pino)	Microscopicamente heterogênea	Microscopicamente heterogênea	Ausente

6. DISCUSSÃO

6.1. Discussão geral

O maior valor de coeficiente de atrito médio neste trabalho foi apresentado pelo par tribológico cobre-aço (entre 0,60 e 0,67), seguido pelo par alumínio-aço (entre 0,42 e 0,43) e pelo par latão-aço (entre 0,27 e 0,32). Os valores de coeficiente de atrito médio para o par cobre-aço estão de acordo com os ensaios tribológicos realizados por Rodrigues et al (RODRIGUES et al., 2015, 2016), que realizaram ensaios pino-disco com par tribológico aço-aço com adição de partículas de cobre e de misturas de cobre-magnetita em temperatura ambiente. No par tribológico cobre-aço, a formação de um tribofilme contendo cobre metálico e óxido de cobre é a possível causa da evolução instável do coeficiente de atrito, vide Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

O gráfico de perda de massa dos pinos, vide Figura 27, mostra que a perda de massa média dos pinos aumenta com a carga normal aplicada. O par tribológico latão-aço apresentou o maior valor de perda de massa dos pinos, enquanto os pinos de cobre apresentaram a menor perda de massa.

Os resultados de perfilometria óptica, vide Figura 29, Figura 30 e Figura 31, mostraram adesão e desgaste dos discos. O par cobre-aço apresentou predominantemente adesão de material do pino no disco associado com desgaste do disco por abrasão e por remoção através de adesão de material ao pino. O par alumínio-aço apresentou a maior presença de abrasão dos três pares tribológicos, enquanto o par tribológico cobre-aço apresentou a maior adesão de material do pino no disco.

A caracterização topográfica corrobora os resultados de interferometria óptica 3D. Para todas as cargas normais aplicadas, a caracterização superficial por microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco do par cobre-aço mostrou a adesão de cobre metálico juntamente com cobre associado com oxigênio, sugerindo tanto adesão de debris metálicos de cobre na superfície juntamente com a adesão de debris óxidos de cobre, vide Figura 36 e Figura 37 e a presença de ilhas de cobre metálico na superfície do disco pode ser o motivo do valor médio de coeficiente de atrito superior a 0,5 com comportamento instável, vide Figura 23, Figura 24 e Figura 25 (RODRIGUES et al., 2016, 2017).

Além disso, a presença de oxigênio ao redor das áreas de adesão de cobre metálico sugere que ele pode atuar como um platô primário, sustentando platôs secundários compostos de debris oxidados (ERIKSSON; LORD; JACOBSON, 2001; MENAPACE et al., 2017).

A caracterização da superfície dos discos do par alumínio-aço mostra regiões com a presença de ferro e predominantemente alumínio associado ao oxigênio, sugerindo a presença de ilhas de óxido de alumínio e, em alguns casos, a aglomeração de debris de ferro do disco misturados com os debris do pino, vide Figura 38 e Figura 39. As superfícies deste par tribológico ensaiadas com carga normal de 10 N apresentaram ilhas de alumínio e oxigênio, enquanto que nos ensaios com 50 N, além das ilhas de alumínio e oxigênio, foi possível visualizar algumas ilhas que sugerem adesão de alumínio metálico.

Por fim, a caracterização da superfície dos discos do par latão-aço mostrou a adesão de ilhas de uma camada composta de cobre e zinco associada com oxigênio e chumbo, vide figuras Figura 40 e Figura 41. Os valores mais baixos de coeficiente de atrito para este par tribológico vide Figura 23, Figura 24 e Figura 25, podem ser explicados pela presença de chumbo na microestrutura do pino de latão, que atua como lubrificante sólido no tribofilme, diminuindo o coeficiente de atrito (AKERSB; BUCHANAN; MOIIANBT, 1991; ÖSTERLE; DMITRIEV, 2016; RODRIGUES et al., 2017).

A caracterização da seção transversal dos três sistemas através de microscopia eletrônica de varredura, vide figuras Figura 42, Figura 43 e Figura 44, mostrou a presença de uma camada aderida à superfície do disco. Nos pares cobre-aço e alumínio-aço houve, adicionalmente, deformação da microestrutura subsuperficial, fenômeno não observado nos ensaios do par latão-aço. Adicionalmente, este mapeamento confirmou os resultados obtidos na análise de interferometria óptica 3D, vide Figura 29 a Figura 31. Para o par cobre-aço sugere-se a presença de tribofilme rico em ferro e oxigênio, além de rico em cobre e oxigênio, indicando oxidação de debris provenientes da remoção de material do disco. Para o par alumínio-aço também sugere-se a presença óxido de alumínio na camada transferida, explicando a perda de massa dos discos, vide Figura 26 e Tabela 9. Para o par latão-aço sugere-se que a camada

transferida formada é rica em principalmente cobre, zinco e chumbo. A oxidação da superfície deste par tribológico é mais visível nas análises de seção transversal do que nas análises superficiais. Além disso, chumbo foi observado na camada transferida.

A análise da secção transversal dos pinos permitiu confirmar que, para o par cobre-aço, houve adesão de material do disco na superfície do pino, confirmando o desgaste por adesão ao pino. Por sua vez, para o par alumínio-aço foi possível verificar a presença de debris de óxido de alumínio e de óxido de ferro na superfície do pino, fenômeno que já foi observado em estudos anteriores (RUIZ-ANDRÉS et al., 2015). Por fim, a análise do pino do par latão-aço sugere que estes pinos sofreram grande deformação e desgaste severo, e estudos anteriores associaram este fenômeno ao trincamento preferencial da interface alfa + beta na camada deformada plasticamente, resultando no destacamento de debris em formato de placas (KÜÇÜKÖMEROĞLU; KARA, 2014).

O desgaste do disco e a presença de adesão do pino podem ser usados para explicar o comportamento tribológico no coeficiente de atrito para os três sistemas, vide Tabela 8. A formação de um terceiro corpo de transformação tribológica superficial, como descrito por Berthier (BERTHIER, 2001) provavelmente controlou o comportamento de deslizamento. A presença de ilhas de adesão metálica presentes no par cobre-aço ajuda a explicar o comportamento instável e o maior valor de coeficiente de atrito médio, vide Figura 23, Figura 24 e Figura 25 e Tabela 8. Mostrou-se que o contato metal-metal aumenta o coeficiente de atrito em comparação com o contato óxido-óxido (DMITRIEV et al., 2008; RODRIGUES et al., 2017). A predisposição do latão de formar platôs secundários já foi descrita por Baklouti (BAKLOUTI et al., 2017) e, além disso, a presença de precipitados ricos em chumbo na microestrutura do latão podem agir como lubrificantes sólidos. O baixo limite de escoamento do chumbo (12 MPa), associado à sua temperatura de fusão relativamente baixa (328ºC), pode estimular sua recristalização dinâmica em temperaturas em torno de 150ºC, com a formação de filmes ricos em chumbo na superfície agindo como lubrificante sólido. A presença de chumbo já foi descrita anteriormente como responsável por diminuir o coeficiente de atrito das ligas de latão de 0,62 para

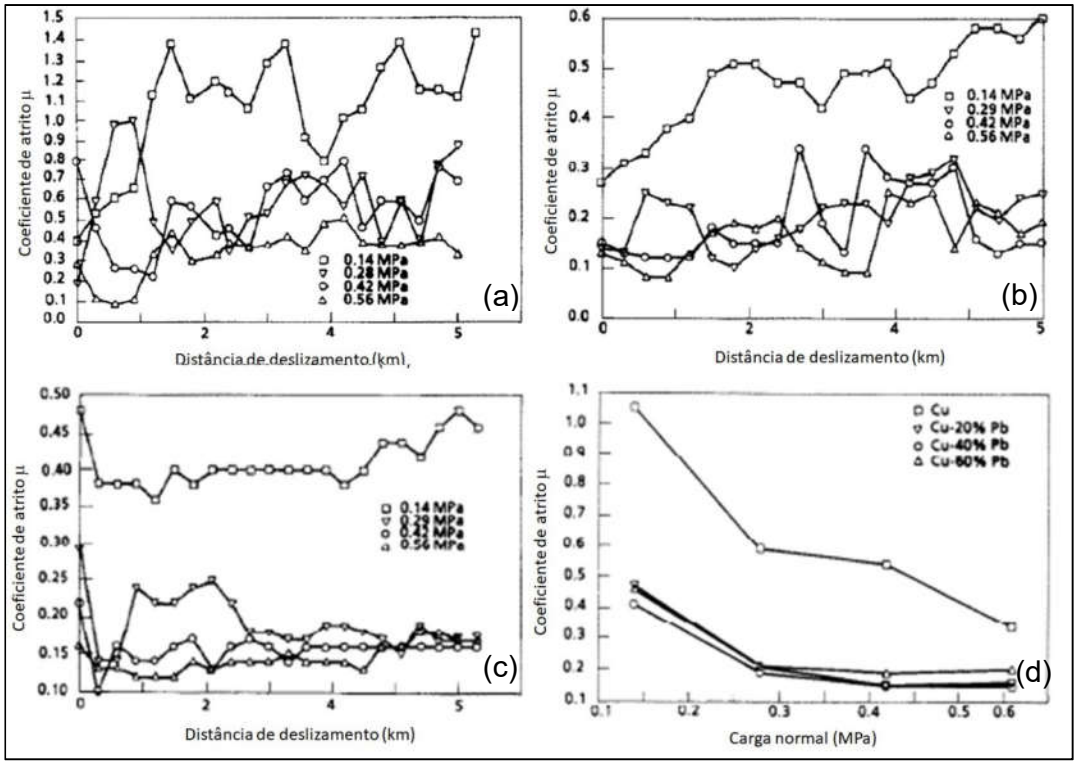
0,32 em ensaios de deslizamento (GANE, 1981). Por fim, no par alumínio-aço, a oxidação dos debris de alumínio e o comportamento abrasivo do óxido de alumínio contribuíram para o desgaste dos discos e para a formação de platôs secundários. Além disso, terceiros corpos abrasivos são conhecidos por estabilizar o coeficiente de atrito e reduzir os níveis de ruído (LEE et al., 2010; LESKOVA et al., 2008).

6.2. Efeito da carga no coeficiente de atrito

Buchanan e colaboradores (AKERSB; BUCHANAN; MOIIANBT, 1991) estudaram o comportamento tribológico de pinos de cobre puro e ligas de cobre-chumbo deslizadas contra discos de aço e observaram que o aumento da carga normal nos pares com pinos de cobre puro e ligas cobre-chumbo reduziu o coeficiente de atrito médio de 1,1 para 0,4 e de 0,45 para 0,20, respectivamente, vide Figura 48 (para comparação, no presente estudo as pressões de contato nominais utilizadas foram de 0,5, 1,0 e 2,5 MPa). Os autores argumentam que a queda do coeficiente de atrito com o aumento da carga normal ocorre porque o coeficiente de atrito é composto por três componentes: o coeficiente de atrito relacionado ao material, o coeficiente de atrito relacionado aos debris e o coeficiente de atrito relacionado ao filme superficial. De acordo com os autores, a contribuição do coeficiente de atrito do filme é significativa para cargas maiores, porque ela causa abrasão do material mais mole do par tribológico, gerando calor e diminuindo o valor do coeficiente de atrito relacionado ao filme.

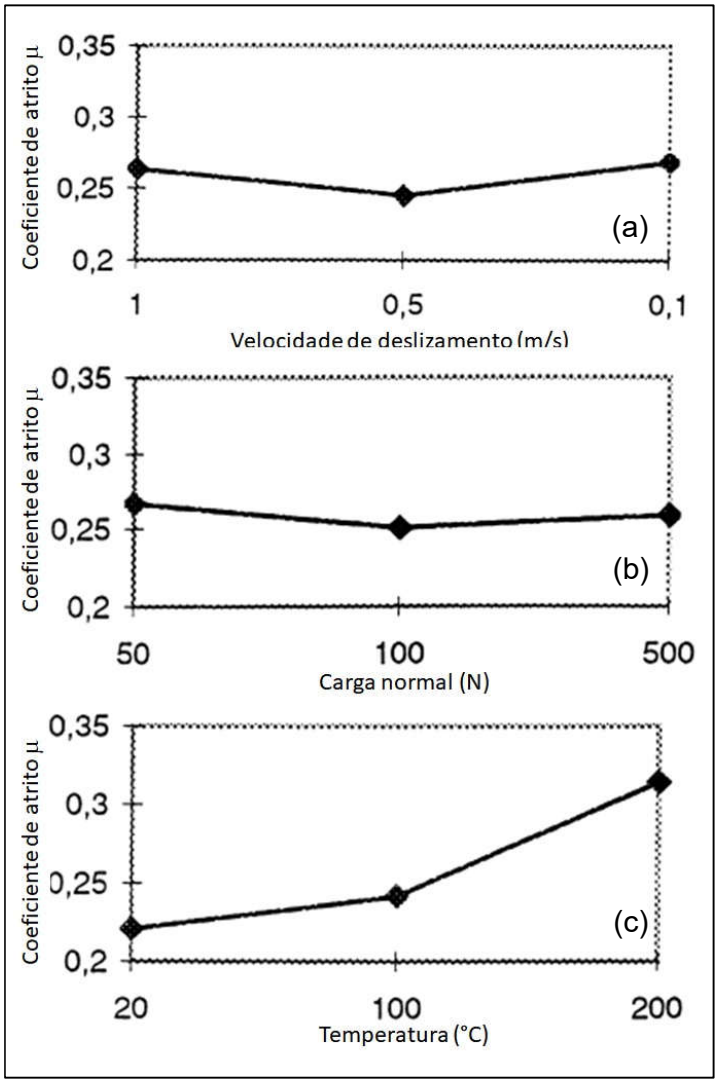
Os resultados da presente investigação, contudo, indicaram que os valores de coeficiente de atrito não foram influenciados pela carga normal, vide Tabela 8. Esta observação está em acordo com os resultados de Davim (DAVIM, 2000), que mostrou que a força normal tem pouco efeito sobre o coeficiente de atrito no sistema latão-aço quando comparado ao efeito da temperatura, por exemplo, vide Figura 49, usando a técnica de Taguchi.

Figura 48 - Ensaio pino disco com pinos de cobre puro e de cobre com adição de chumbo. (a) Ensaio com pino de cobre puro com diferentes cargas normais; (b) Ensaio com pino de cobre com 20% de chumbo com diferentes cargas normais; (c) Ensaio com pino de cobre com 40% de chumbo com diferentes cargas normais; (d) Comportamento das quatro ligas em função da carga normal aplicada no ensaio.



Fonte: (AKERSB; BUCHANAN; MOIIANBT, 1991).

Figura 49 - Comportamento do coeficiente de atrito do par tribológico latão-aço. (a) Efeito da variação da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito; (b) Efeito da velocidade de deslizamento no coeficiente de atrito; (c) Efeito da temperatura no coeficiente de atrito.



Fonte: (DAVIM, 2000).

Nota-se o aumento da severidade do contato dos pares tribológicos com o aumento da carga normal, vide Figura 50 e Figura 51. Verifica-se que os pinos de cobre foram os que mais sofreram alteração da superfície, como foi visto nos perfis 3D da Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

Figura 50 - Evolução da rugosidade com o aumento da carga normal. Para todos os materiais de pinos houve aumento da rugosidade Sa das superfícies dos discos de aço.

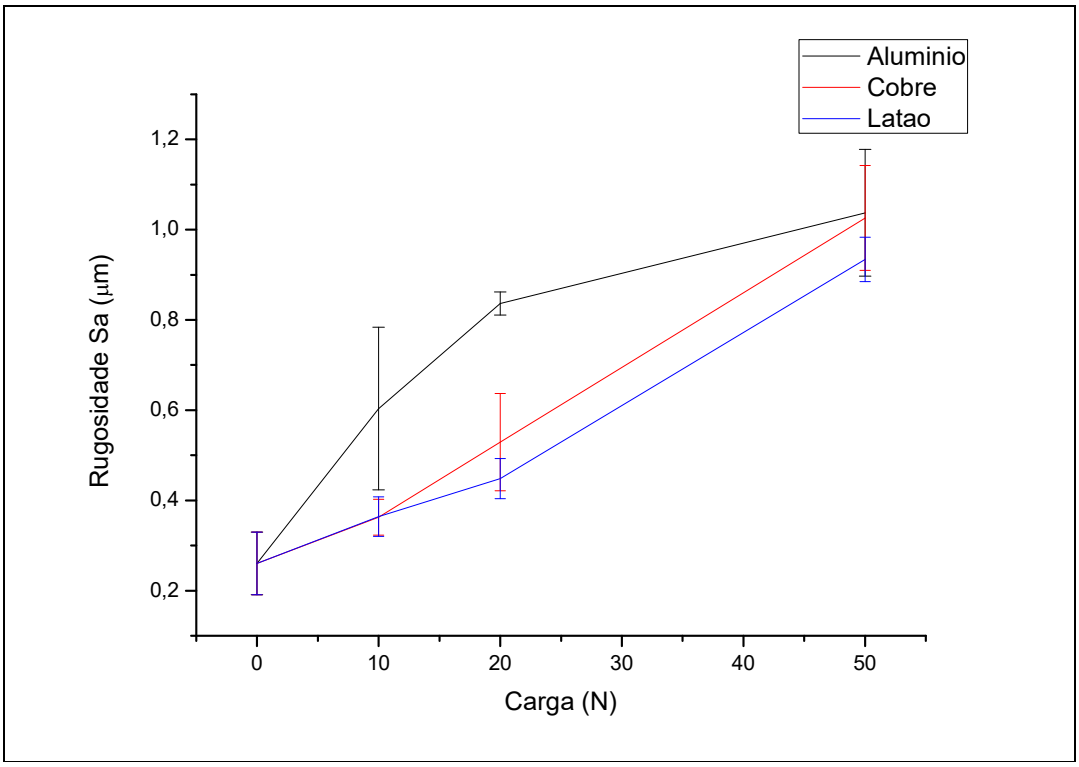
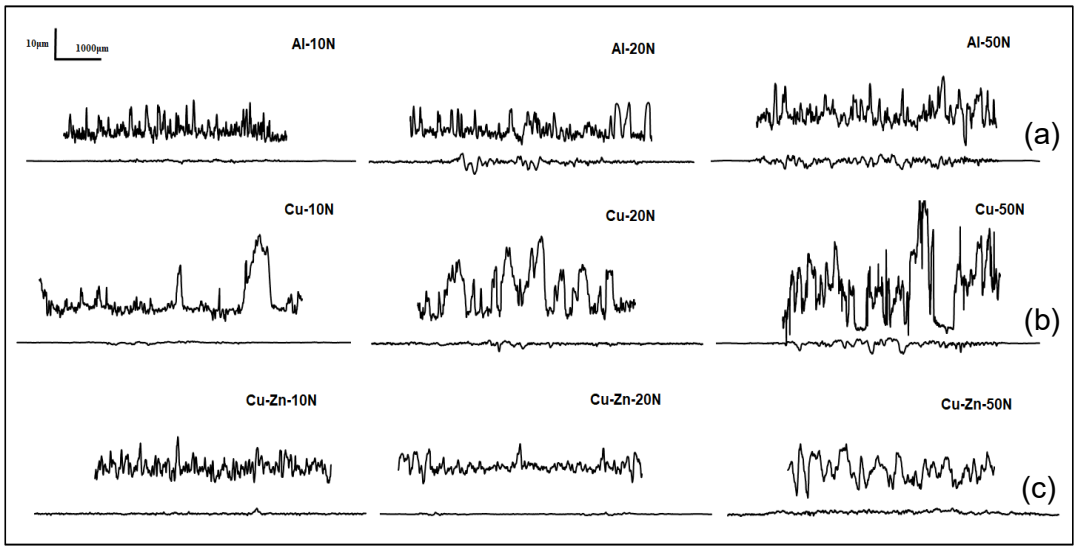


Figura 51 - Perfis de rugosidade 2D dos pares tribológicos após os ensaios pino-disco. (a) Par alumínio-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente; (b) Par cobre-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente; (c) Par latão-aço com 10, 20 e 50 N de carga normal, respectivamente.



Nota-se que com o aumento da carga houve aumento da rugosidade dos discos em todos os pares tribológicos e cargas normais, porém apenas nos discos ensaiados contra pinos de alumínio e cobre houve desgaste do disco, e nos discos ensaiados com pinos de latão houve apenas adesão de material do pino. É possível associar os mecanismos de desgaste visualizados por interferometria óptica 3D ao comportamento do coeficiente de atrito dos pares tribológicos e à carga normal aplicada.

O par cobre-aço apresentou coeficiente de atrito instável e superfície com adesão de material do pino, *scuffing* e *galling,* que são mecanismos de desgaste associados à adesão e posterior remoção de material do disco ao pino, que justifica também o elevado coeficiente de atrito.

O par alumínio-aço apresentou coeficiente de atrito estável, quando comparado ao par cobre-aço, e superfície com abrasão e formação de ilhas de óxido de alumínio.

Por fim, o par latão-aço apresentou coeficiente de atrito estável, com valor médio menor que aqueles apresentados pelos pares cobre-aço e alumínio-aço, e superfície com adesão de material do pino ao disco.

6.3. Instabilidade do coeficiente de atrito

Com relação à estabilidade de evolução do coeficiente de atrito durante o ensaio tribológico, Bouchoucha e colaboradores (BOUCHOUCHA et al., 1995) realizaram ensaios pino-disco (pino de cobre e disco de aço inoxidável) em atmosferas contendo ar, argônio puro e finalmente oxigênio puro. Adicionalmente, para cada condição, os autores estudaram a evolução do coeficiente de atrito com e sem aplicação de corrente elétrica de 40 amperes através do pino de cobre.

Em atmosfera com argônio puro, o comportamento tribológico do sistema cobre/aço inoxidável foi estável em termos de evolução do coeficiente de atrito, cujo valor médio foi de 0,67, vide Tabela 10. Em atmosfera com mistura de argônio e oxigênio e sem aplicação de corrente, o comportamento tribológico do sistema cobre-aço inoxidável se manteve estável, porém o coeficiente de atrito caiu para 0,60 devido à presença predominante de óxido de cobre no tribofilme (desgaste oxidativo). Este valor médio do coeficiente de atrito está próximo ao observado para o par cobre-aço na presente investigação (vide Tabela 8), mas seu comportamento estável não está em acordo com comportamento instável de evolução do coeficiente de atrito observado na presente investigação apenas para o par cobre-aço, vide Figura 52, Figura 23, Figura 24 e Figura 25, para os ensaios realizados com pinos de cobre.

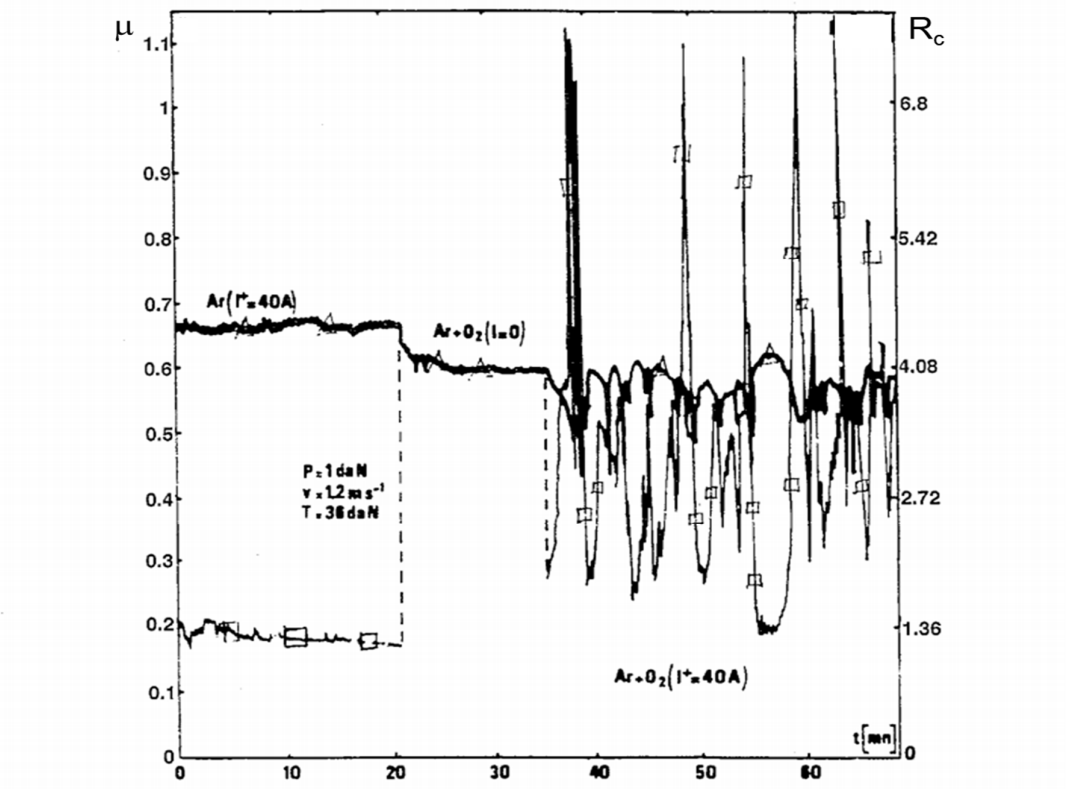
É interessante notar que Bouchoucha e colaboradores (BOUCHOUCHA et al., 1995) obtiveram resultados de evolução instável do coeficiente de atrito (entre 0,2 e 1,1) em atmosfera com mistura de argônio e oxigênio e com aplicação de corrente de corrente de 40 amperes e os autores explicaram este comportamento pela formação de arcos elétricos localizados, que promoveram o aumento da temperatura de contato, a formação de debris de óxidos abrasivos (óxidos de ferro e de cromo) e a ação do desgaste abrasivo. Ou seja, a instabilidade na evolução coeficiente de atrito é causada pela ação conjunta de desgaste oxidativo, abrasivo e, possivelmente, de contato adesivo (BOUCHOUCHA et al., 1995).

Tabela 10 - Comparação do coeficiente de atrito e do desgaste em atmosferas de ar, oxigênio e argônio com carga normal de 10 N, corrente elétrica de 0 e de 40 A e velocidade de deslizamento de 1,2 m/s.

	Ar	Oxigênio	Argônio	Corrente (A)
μ	0,60	0,60	0,69	0
	0,57	0,57	0,69	40
W (mg/h)	16	28	5	40
	12	24	5	0

Fonte: (BOUCHOUCHA et al., 1995)

Figura 52 - Evolução do coeficiente de atrito em função do tempo e da aplicação de corrente elétrica com variação atmosférica. (a) Coeficiente de atrito estável em torno de 0,67 com aplicação de 40 amperes de corrente com atmosfera de argônio; (b) Coeficiente de atrito estável em torno de 0,60 sem aplicação de corrente com atmosfera de argônio e oxigênio; (c) Coeficiente de atrito instável em torno de 0,58 com aplicação de 40 amperes de corrente com atmosfera de argônio e oxigênio.



Fonte: (BOUCHOUCHA et al., 1995)

Em outro estudo, Buchanan e colaboradores (AKERSB; BUCHANAN; MOIIANBT, 1991) estudaram o comportamento tribológico de pinos de cobre puro e ligas de cobre-chumbo deslizadas contra discos de aço submetidos a cargas normais de 0,14 a 0,56 MPa (para efeito de comparação, os valores de carga normal desta dissertação foram de 0,08 a 0,41 MPa), e observaram comportamento instável de evolução do coeficiente de atrito para os pinos de cobre puro (entre 0,1 e 1,4) e ligas de cobre-chumbo (entre 0,1 e 0,6), vide Figura 48. Os autores atribuíram este comportamento instável do coeficiente de atrito ao fenômeno de *stick-slip* ("cola-desliza"), que ocorre quando há adesão metal-metal no contato entre os corpos, que aumenta o coeficiente de atrito até que esta adesão se quebra, ocorrendo novo deslizamento e queda do coeficiente de atrito, com formação e deslizamento sobre uma camada de óxido, até que o processo se repita, com nova adesão metálica.

6.4. Efeito do material do pino no coeficiente de atrito

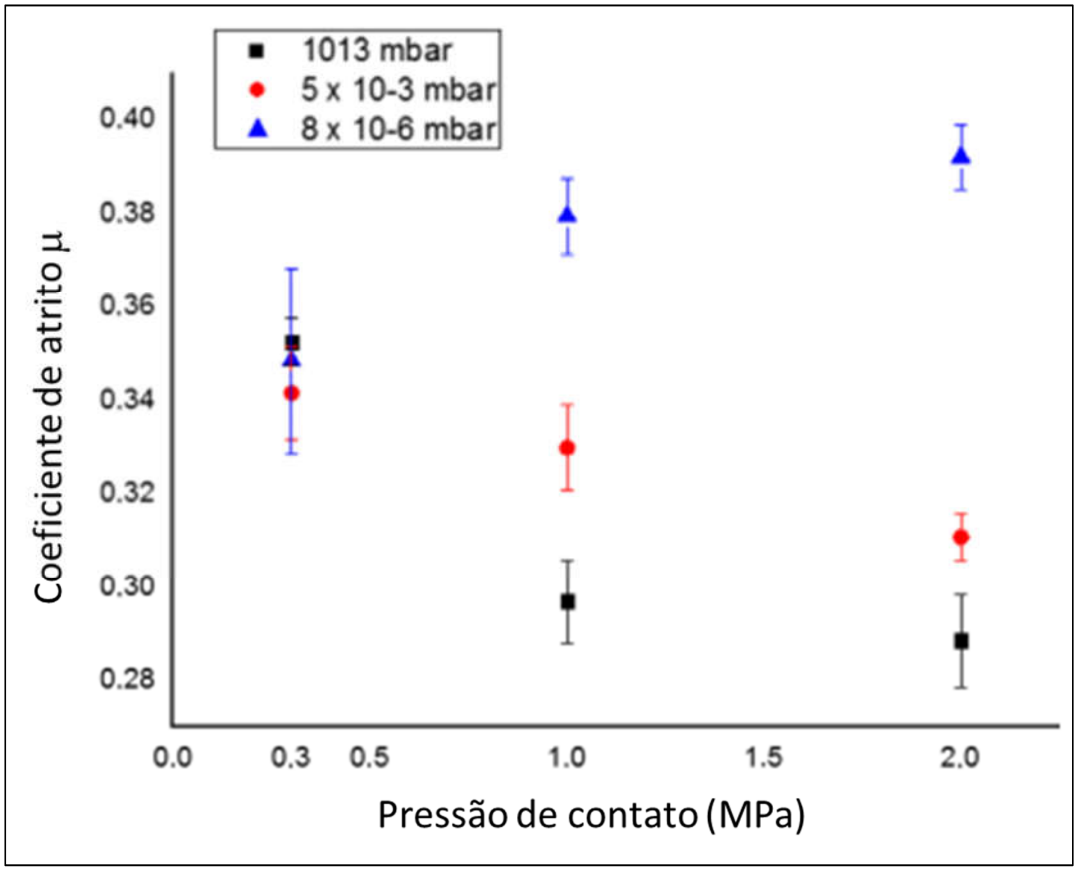
Como apresentado anteriormente, o par cobre-aço apresentou o maior valor de coeficiente de atrito (entre 0,60 e 0,67), seguido pelo par alumínio-aço (entre 0,42 e 0,43) e pelo par latão-aço (entre 0,27 e 0,32). Logo, verifica-se que a composição química do pino utilizado tem forte influência no coeficiente de atrito do par tribológico.

Buchanan e colaboradores (AKERSB; BUCHANAN; MOIIANBT, 1991) estudaram o comportamento tribológico de pinos de cobre puro e ligas de cobre-chumbo deslizadas contra discos de aço e observaram que os pinos com presença de chumbo apresentaram menor valor do coeficiente de atrito do que os pinos de cobre puro, associando este comportamento ao lubrificante que o chumbo possui, vide Figura 48.

Küçükömeroğlu e Kara (KÜÇÜKÖMEROĞLU; KARA, 2014) estudaram o comportamento tribológico de liga de cobre com 39% de zinco e 3% de chumbo contra aço sob pressão atmosférica e sob vácuo com diferentes pressões de contato superficial e obtiveram valores de coeficiente de atrito entre 0,35 e 0,29, em pressão atmosférica, e valores entre 0,35 e 0,40 sob vácuo, vide Figura 53. Os autores argumentam que este comportamento dos pinos de latão em pressão atmosférica ocorre devido a dois fatores: à oxidação do filme aderido à superfície

do disco devido à presença de oxigênio e umidade relativa do ar e à presença de chumbo na superfície. Este elemento, que possui baixa módulo de cisalhamento, baixo limite de escoamento e baixa dureza, vide Tabela 2, se espalha facilmente pela superfície em contato, agindo como lubrificante sólido.

Figura 53 - Comportamento do coeficiente de atrito do par tribológico latão-aço com o aumento da pressão de contato para diferentes condições de pressão atmosférica e vácuo.

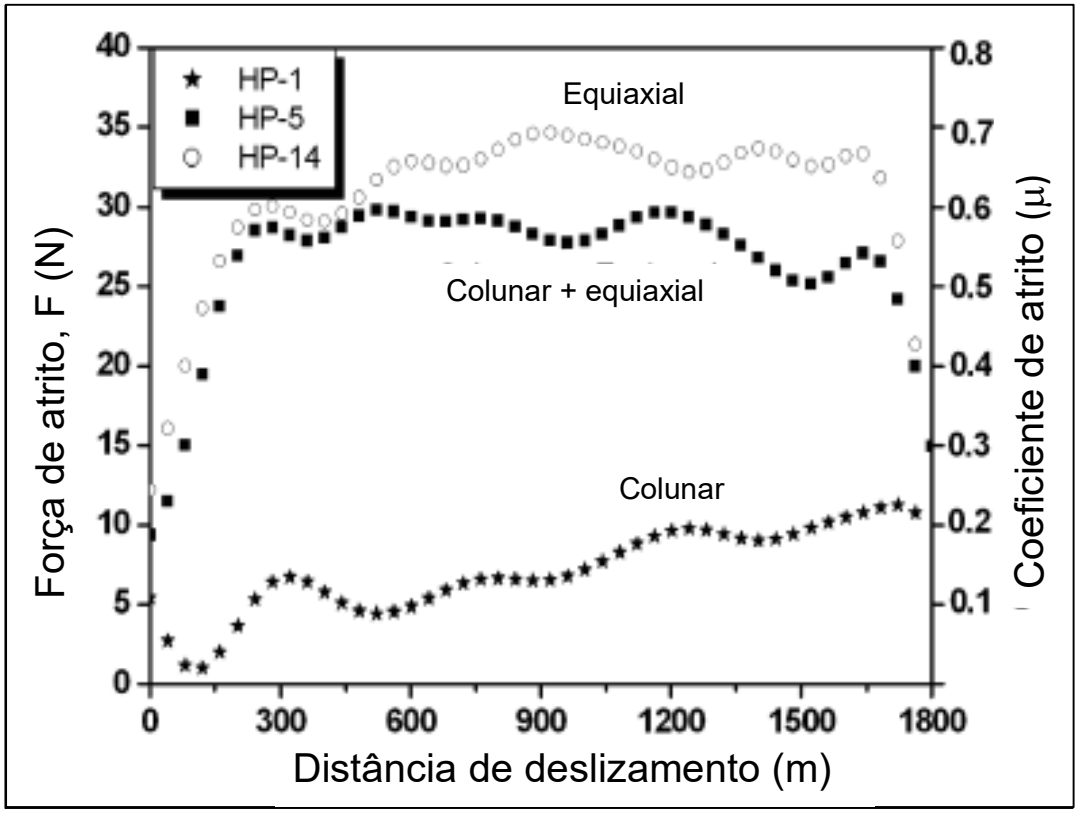


Fonte: (KÜÇÜKÖMEROĞLU; KARA, 2014).

Prasada Rao e colaboradores (PRASADA RAO et al., 2008) avaliaram o comportamento tribológico do alumínio puro com diferentes tamanhos de grão microestrutural através do ensaio pino-disco contra disco de aço com 64 HRc de dureza com e carga normal de 50 N, e obtiveram coeficiente de atrito de 0,7 para alumínio com grãos equiaxiais, aproximadamente 0,6 para grãos colunares e equiaxiais e 0,2 para grãos colunares, vide Figura 54. Os autores atribuem este comportamento ao fato de a diminuição do tamanho de grão aumentar a

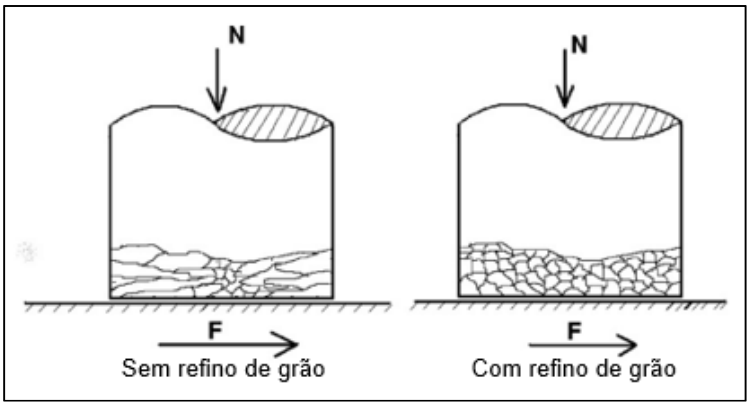
resistência ao cisalhamento, responsável pela remoção de material da superfície do pino durante o deslizamento, vide Figura 54.

Figura 54 - Evolução do coeficiente de atrito em durante o deslizamento de alumínio contra aço endurecido ao cromo com carga de 50 N e velocidade de deslizamento de 1 m/s.



Fonte: (PRASADA RAO et al., 2008).

Figura 55 - Representação esquemática da tribosuperfície de amostras de alumínio fundido sem e com refino de grão indicando as forças atuando sobre as amostras.



Fonte: (PRASADA RAO et al., 2008).

Ao se considerar o módulo de cisalhamento dos materiais ensaiados, faz sentido que o maior valor de coeficiente de atrito médio seja obtido nos ensaios com pinos de cobre (módulo de cisalhamento entre 46 e 50 GPa), o valor intermediário de coeficiente de atrito seja obtido com os pinos de alumínio (módulo de cisalhamento entre 25 e 27 GPa) e o menor valor de coeficiente de atrito seja obtido com o pino de latão (módulo de cisalhamento entre 37 e 39 GPa, porém com a presença de chumbo, que atua como lubrificante sólido e possui módulo de cisalhamento de apenas 4 a 6 GPa), vide Tabela 2, uma vez que o coeficiente de atrito é uma relação entre a força de atrito (paralela à superfície e responsável pelo cisalhamento, resultante da interação entre os materiais e superfícies) e a força normal (perpendicular à superfície).

Hutchings (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017) apresentou valores de coeficiente de atrito médio para alguns metais e ligas deslizados contra aço-carbono com 0,13% ao ar, vide Tabela 11.

Tabela 11 - Valores médios de coeficiente de atrito de metais e ligas deslizados contra aço com 0,13% de carbono.

Liga	**Coeficiente de atrito**
Alumínio	0,5
Cobre	0,8
Cobre com 20% de chumbo	0,2
Latão com 30% de zinco	0,5
Latão com 40% de zinco e chumbo	0,2

Fonte: (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

7. CONCLUSÕES

Os ensaios pino-disco permitiram a comparação de pinos de cobre, alumínio e latão sob diferentes cargas normais. A caracterização mostra que, para todas as condições ensaiadas, as características do tribofilme foram responsáveis pelo comportamento da evolução do coeficiente de atrito.

- A formação de ilhas de adesão de cobre metálico na superfície do disco gera instabilidade no coeficiente de atrito devido à adesão, resultando em coeficiente de atrito médio de aproximadamente 0,65;

- O desgaste dos pinos de alumínio forma uma camada de óxido de alumínio que provoca o desgaste abrasivo da superfície do disco, porém leva a valores médios de coeficiente de atrito mais baixos e estáveis de aproximadamente 0,42, quando comparados com os pinos de cobre;

- O desgaste dos pinos de latão apresentou o menor valor médio de coeficiente de atrito de aproximadamente 0,30, estável, e este comportamento está possivelmente associado à presença de chumbo na microestrutura do latão, que age como lubrificante sólido;

- A análise de seção transversal dos discos permitiu a caracterização do tribofilme e da camada deformada plasticamente, porém a seleção da área de análise deve ser melhor realizada, assim como os posteriores procedimentos de preparação metalográfica.

Embora um método de ensaio tribológico simples tenha sido utilizado para comparar as três ligas com valores aproximados de dureza e de condutibilidade térmica, os diferentes valores e comportamentos do coeficiente de atrito mostram que a formação de tribofilmes e de platôs de contato, assim como a natureza dos óxidos formados durante o contato tribológico, compõe uma distinta combinação de fatores que influencia fortemente o comportamento tribológico destes materiais.

Outros estudos devem ser realizados considerando diferentes tempos de duração, e possivelmente remoção de debris, para melhor caracterizar os efeitos dos óxidos e das camadas aderidas nos ensaios com pinos de cobre.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

I. Estudar o comportamento tribológico do par cobre-aço com tempos de ensaio diferentes e com ensaios interrompidos, para que se possa verificar a influência da distância de deslizamento no coeficiente de atrito.

II. Analisar a superfície dos pinos através de microscopia eletrônica de varredura.

III. Analisar a seção transversal do pino, para que se possa verificar o efeito do deslizamento em sua microestrutura e no tribofilme formado.

IV. Selecionar a área do disco a ser seccionada com uma lupa, para que se direcione o corte sobre uma região da superfície com maior presença de tribofilme.

V. Medir dureza da seção transversal dos discos e pinos, para que se possa verificar o efeito do deslizamento nas propriedades mecânicas dos materiais, e também qual a sua influência na formação e sustentação do tribofilme na superfície.

VI. Analisar os debris formados no ensaio através de técnicas adequadas.

VII. Realizar as análises de seção transversal em modo de EBSD.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERSB, A.; BUCHANAN, V. E.; MOIIANBT, P. A. Frictional behavior of non-equilibrium Cu-Pb alloys. **Wear**, [s. l.], v. 146, p. 241–256, 1991.

ASTM. Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus. **ASTM International**, [s. l.], v. 05, n. Reapproved 2010, p. 1–5, 2011.

AZEVEDO, Prof Cesar R. F.; ÖSTERLE, W. Brake Disc System : Microstructural Characterisation of Tribofilms and Wear Particles. **Projeto FAPESP**, [s. l.], p. 1–42, 2011.

BAKLOUTI, M. et al. Brass in brake linings: Key considerations for its replacement. **Journal of Engineering Tribology**, [s. l.], v. 231, p. 461–468, 2017.

BERTHIER, Yves. **Background on Friction and Wear**. [s.l.] : Academic Press, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-443341-0.50074-0>

BHUSHAN, Bharat. **Principles and Applications of Tribology, Second Edition**. [s.l: s.n.].

BHUSHAN, Bharat. **Introduction to Tribology, Second Edition**. Second edi ed. [s.l: s.n.].

BLAU, P. J. **Friction science and technology: from concepts to applications**. 2nd ed ed. [s.l.] : Taylor & Francis Group, LLC, 2009.

BOUCHOUCHA, A. et al. Metals transfer and oxidation of copper-steel surfaces in electrical sliding contact. **Surface and Coatings Technology**, [s. l.], v. 76–77, n. PART 2, p. 521–527, 1995.

COPPER DEVELOPMENT ASSOCIATION INC, Cu. **Copper in Brake Pads**. [s.d.]. Disponível em: <https://www.copper.org/environment/impact/copper-brake.html>.

DAVIM, J. Paulo. An experimental study of the tribological behaviour of the brass / steel pair. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 100, p. 273–277, 2000.

DHOKEY, Narendra; RANE, Kedarnath. Wear Behavior and Its Correlation with Mechanical Properties of TiB2 Reinforced Aluminium-Based Composites. **Advances in Tribology**, [s. l.], v. 2011, 2011.

DMITRIEV, A. I. et al. Computer modeling of local tribological contacts by the example of the automotive brake friction pair. **Physical Mesomechanics**, [s. l.], v. 11, n. 1–2, 2008.

ERIKSSON, Mikael; LORD, John; JACOBSON, Staffan. Wear and contact conditions of brake pads : dynamical in situ studies of pad on glass. **Wear**, [s. l.], v. 249, p. 272–278, 2001.

FEDERICI, Matteo et al. A preliminary investigation on the use of the pin-on-disc test to simulate off-brake friction and wear characteristics of friction materials. **Wear**, [s. l.], v. 410–411, p. 202–209, 2018.

GANE, N. The effect of lead on the friction and machining of brass. **Philosophical Magazine A: Physics of Condensed Matter, Structure, Defects and Mechanical Properties**, [s. l.], v. 43, p. 545–566, 1981.

GODET, Maurice. The third-body approach: A mechanical view of wear. **Wear**, [s. l.], v. 100, n. 1–3, p. 437–452, 1984.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. [s.l.] : St Edmundsbury Press, 1992.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. **Tribology - Friction and Wear of Engineering Materials**. Second Edi ed. [s.l: s.n.].

JACOBSON, Staffan; HOGMARK, Sture. 5 . Tribofilms – On the crucial importance of tribologically induced surface modifications. In: **Recent Developments in Wear Prevention, Friction and Lubrication**. [s.l: s.n.]. p. 197–225.

JOST, H. Peter. Tribology - origin and future. **Wear**, [s. l.], v. 136, p. 1–17, 1990.

KATO, Hirotaka. Severe – mild wear transition by supply of oxide particles on sliding surface. **Wear**, [s. l.], v. 255, p. 426–429, 2003.

KATO, Koji. Wear in relation to friction — a review. **Wear**, [s. l.], v. 241, p. 151–157, 2000.

KÜÇÜKÖMEROĞLU, Tevfik; KARA, Levent. The friction and wear properties of CuZn39Pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions. **Wear**, [s. l.], v. 309, p. 21–28, 2014.

LEE, E. J. et al. Morphology and Toughness of Abrasive Particles and Their Effects on the Friction and Wear of Friction Materials : A Case Study with Zircon and Quartz. **Tribology Letters**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 637–644, 2010.

LESKOVA, Jana et al. Effects of silicon carbide in semi-metallic brake materials on friction performance and friction layer formation. **Wear**, [s. l.], v. 265, p. 1121–1128, 2008.

LUDEMA, K. C. **Friction, wear, lubrication: a textbook in tribology**. [s.l.] : CRC Press, 1996.

MENAPACE, Cinzia et al. Pin-on-disc study of brake friction materials with ball-milled nanostructured components. **Materials and Design**, [s. l.], v. 115, p. 287–298, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.11.065>

ÖSTERLE, W. et al. A comprehensive microscopic study of third body formation at the interface between a brake pad and brake disc during the final stage of a pin-on-disc test. **Wear**, [s. l.], v. 267, n. 5–8, p. 781–788, 2009.

ÖSTERLE, W. et al. On the role of copper in brake friction materials. **Tribology International**, [s. l.], v. 43, p. 2317–2326, 2010.

ÖSTERLE, W.; DMITRIEV, A. I. The Role of Solid Lubricants for Brake Friction Materials. **Lubricants**, [s. l.], v. 4, 5, p. 1–22, 2016.

PRASADA RAO, A. K. et al. Microstructure and the wear mechanism of grain-refined aluminum during dry sliding against steel disc. **Wear**, [s. l.], v. 264, n. 7–8, p. 638–647, 2008.

RODRIGUES, A. C. P. Efeito do cobre como adição interfacial no sistema tribológico pino x disco. [s. l.], p. 103, 2015.

RODRIGUES, A. C. P. et al. Effect of Cu particles as an interfacial media addition on the friction coefficient and interface microstructure during (steel/steel) pin on disc tribotest. **Wear**, [s. l.], v. 330–331, p. 70–78, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.006>

RODRIGUES, A. C. P. et al. Pin-on-disc tribotests with the addition of Cu particles as an interfacial media: Characterization of disc tribosurfaces using SEM-FIB techniques. **Tribology International**, [s. l.], v. 100, p. 351–359, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.034>

RODRIGUES, A. C. P. et al. Impact of copper nanoparticles on tribofilm formation determined by pin-on-disc tests with powder supply: Addition of artificial third body consisting of Fe2O3, Cu and graphite. **Tribology International**, [s. l.], v. 110, p. 103–112, 2017.

RUIZ-ANDRÉS, M. et al. Wear Behavior of Aluminum Alloys at Slow Sliding Speeds. **Tribology Transactions**, [s. l.], v. 58, p. 955–962, 2015.

SINATORA, Amilton. Tribologia : Um resgate histórico. [s. l.], 2005.

STACHOWIAK, Gwidon W.; BATCHELOR, Andrew W. **Engineering Tribology**. [s.l.] : Elsevier, 2014.

TOXIC SUBSTANCES CONTROL, California Department. **Brake Pad Legislation**. 2010. Disponível em: <http://www.dtsc.ca.gov/SCP/BrakePadLegislation.cfm>.

ZUM GAHR, K. H. Microstructure and Wear of Materials. **Tribology Series**, [s. l.], v. 10, p. 351–495, 1987. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167892208707247>