

Victor Flosi Alexandre Peão

Medição e caracterização das camadas deformadas plasticamente de pinos de aço utilizados em ensaios tribológicos do tipo pino contra disco com adição de Cu 400 μ m, Cu 20 μ m, grafite particulado e sem adição de meio interfacial.

São Paulo

2014

Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais da
Escola Politécnica da USP

Victor Flosi Alexandre Peão

Medição e caracterização das camadas deformadas plasticamente de pinos de aço utilizados em ensaios tribológicos do tipo pino contra disco com adição de Cu 400 μ m, Cu 20 μ m, grafite particulado e sem adição de meio interfacial.

**Trabalho de Formatura
apresentado à
Escola Politécnica da
Universidade de
São Paulo**

**Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais**

**Orientador: Professor Doutor
Cesar R. F. Azevedo**

São Paulo

2014

Resumo

Há uma necessidade crescente de se preservar os recursos energéticos não renováveis. Uma maneira de aprimorar seu aproveitamento é diminuir as perdas energéticas causadas pelo atrito e desgaste. Existe uma importância real em compreender o comportamento das camadas endógenas e exógenas em um sistema tribológico. O presente trabalho visa relacionar o coeficiente de atrito obtido durante os ensaios tribológicos do tipo pino contra disco com o tamanho da camada deformada plasticamente dos pinos ensaiados e caracterizar as camadas próximas à superfície de contato desses pinos. Os pinos de aço AISI 4140 foram ensaiados por uma hora contra discos de aço AISI H13 com uma carga normal de 10N e o coeficiente de atrito foi coletado segundo a segundo durante o experimento. Foram adicionadas diferentes partículas a cada ensaio. Acrescentou-se 1,8 gramas de cobre com duas granulometrias diferentes (400 μ m e 20 μ m), 1,0 grama de grafite particulado e também foi feito um ensaio sem adição de partículas. Os pinos foram analisados longitudinalmente e encontrou-se uma correlação entre o tamanho e tipo de material adicionado com o coeficiente de atrito e o tamanho da camada deformada plasticamente. Observou-se o processo de formação de material particulado (debris) causado pelo desgaste da superfície do pino.

Abstract

There is a growing need to preserve the non-renewable energy resources. One way to preserve these resources is to reduce the energy and material losses caused by friction and wear. There is a real importance to understand the behaviour of the contacting surfaces in tribological system. The present study aims to investigate the correlation between the coefficient of friction obtained during pin-on-disc tribological tests with depth of the plastically deformed layer in the pins. AISI 4140 steel pins were tested for an hour with a 10N normal load against steel discs AISI H13. Different interfacial media were added to each tribotest (1.8 grams of copper with two different particle sizes - 400 μ m and 20 μ m; 1.0 gram of particulate graphite; and a test without the addition of particles). The evolution of the friction coefficient was measured and microstructural characterization of pins was performed along with x-ray mapping on the disc surfaces. The microstructure of the pins were analysed longitudinally. The results showed a relationship between the size and type of interfacial media with the depth of the deformed plastically layer and the friction coefficient. The mechanism for the formation of debris on the pin surface could be observed.

Legendas das Figuras

Figura 1: Detalhes e especificações das camadas típicas e suas espessuras.	9
Figura 2: Esquema de um ensaio pino em disco.....	10
Figura 3: Dimensões em milímetros do disco utilizado nos ensaios.	12
Figura 4: Forma do indentador Vickers (Instron).....	15
Figura 5: Gráfico dos resultados do teste de dureza e a dureza média dos pinos de aço 4140 virgens utilizados no ensaio pino contra disco.....	17
Figura 6: Gráfico do resultado do teste de dureza e a dureza média dos discos de aço H13 virgens utilizados no ensaio pino contra disco.	17
Figura 7: Gráfico da variação do coeficiente de atrito pela distância percorrida pelo pino nos diferentes ensaios.....	19
Figura 8: Detalhe da microestrutura martensítica do pino. Aumentos de 1500,2000, 5000 e 10000 vezes. SEI-MEV.	21
Figura 9: Detalhe da microestrutura martensítica do pino. Aumento de 10000 vezes. SEI-MEV.....	22
Figura 10 - Imagens de uma seção transversal do pino após ensaio com Cu 400 mm. Observa-se a heterogeneidade na formação de camadas superficiais exógenas e endógenas do pino, principalmente nas imagens com menor aumento. SEI-MEV.	23
Figura 11: EDS por ponto realizado na camada 1 da Figura 12 indicando a presença de oxigênio (óxido de ferro) na análise.	24
Figura 12: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m e em destaque suas camadas exógenas (óxido e debris, camada 1) e endógena (camada deformada plasticamente, camada 2, com presença de trincas). SEI-MEV.	24
Figura 13: Imagem com 5000 vezes de aumento da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m na qual se está indicada uma camada pequena e irregular de óxido e quase não se observa a presença de camada deformada plasticamente. SEI-MEV.....	25
Figura 14: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m. Uma região altamente deformada com desprendimento de material e trincas. As	

setas A indicam trincas e a seta B aponta para um pedaço quase destacado do pino. SEI-MEV.....	26
Figura 15: Imagens da seção transversal do pino ensaiado com acréscimo de Cu 20µm. Nas imagens com menor aumento fica clara a não homogeneidade das camadas presentes na superfície do pino. SEI-MEV.	27
Figura 16: Detalhe da imagem da seção transversal do pino ensaiado com acréscimo de Cu 20µm. As setas A indicam trincas, setas B apontam para misturas de pedaços descolados da peça misturados com as partículas de cobre adicionadas ao ensaio e as setas C apontam para região deformada durante o ensaio. SEI-MEV.	28
Figura 17: Locais em que foram realizadas as microanálises EDS no pino ensaiado com adição de Cu 20µm.	29
Figura 18: Imagem com 10000x de aumento da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20µm em destaque sua camada deformada. SEI-MEV.....	30
Figura 19: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20µm, as setas A indicam regiões mais desgastadas do que as apontadas pelas setas B. SEI-MEV.....	31
Figura 20: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20µm. Região altamente deformada plasticamente. SEI-MEV.	32
Figura 21: Sequência de imagens feitas a partir de uma seção transversal do pino ensaiado com adição de grafite particulado em que se observa uma superfície extremamente deformada plasticamente e desgastada. SEI-MEV	33
Figura 22: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de grafite particulado e destaque da camada deformada com espessura média de 2,0 µm. SEM-MEV.....	34
Figura 23: Imagens do pino ensaiado com adição de grafite particulado. Observa-se a alta deformação plástica da superfície junto com um elevado desgaste, partículas que se destacam do pino e debris. SEM-MEV.....	35
Figura 24: Imagem do pino ensaiado sem nenhuma adição. As setas A indicam regiões muito desgastadas, setas B apontam para camadas de óxido completamente descoladas do pino, as setas C apontam para região que estão no meio do processo de descolamento da amostra e as setas D apontam para trincas. SEI-MEV.....	36

Figura 25: Imagem do pino ensaiado sem nenhuma adição. As três regiões em que foram feitas as análises EDS nessa amostra.	37
Figura 26: Imagem de uma seção transversal do pino ensaiado sem nenhuma adição. Em destaque a camada deformada com espessura média de 3,8 μm	38
Figura 27: Região do disco ensaiado com adição de Cu 400 μm em que foi realizado mapeamento de raios-x com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor presença de oxigênio e menor desgaste (indicada pelas setas A) e regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B).	40
Figura 28: Mapas de raios-x do oxigênio, ferro e carbono. Produzidas a partir da Figura 27.	41
Figura 29: Região do disco ensaiado com adição de grafite em que foi realizado mapeamento de raios-x com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor deformação plástica (indicada pelas setas A), regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B) e regiões em que provavelmente está depositado o grafite adicionado (indicadas pelas setas C).	42
Figura 30: Mapas de raios-x do oxigênio, ferro e carbono. Produzidos a partir da Figura 29.	43
Figura 31: Região do disco ensaiado sem adição de meio interfacial em que foi realizado mapeamento de raios-X com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor deformação plástica (indicada pelas setas A) e regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B).	44
Figura 32: Mapas de raios-X do oxigênio e ferro. Produzidas a partir da Figura 31.	44
Figura 33 - Tamanho médio da camada deformada plasticamente de cada pino ensaiado.	46
Figura 34: Pinos com diferentes graus de desgaste após serem ensaiados no tribômetro utilizado para realização dos experimentos analisados nesse trabalho. As regiões claras são regiões em que não houve desgaste durante o ensaio, as marcas observadas são do lixamento prévio. Consegue-se observar que as marcas escuras foram causadas por partículas muito menores que as partículas que causaram as marcas claras.	48

Índice de Equações

Equação 1: Coeficiente de atrito relaciona a força de atrito com a força normal entre os corpos.....	2
--	---

Índice de Tabelas

Tabela 1: Composições químicas nominais do pino e do disco em porcentagem atômica.....	11
Tabela 2: Descrição e detalhes dos diferentes materiais que foram adicionados no ensaio pino contra disco.....	12
Tabela 3: Tabela com resultados dos ensaios de dureza dos diferentes pinos de aço 4140 virgens utilizados para os ensaios tribológicos.....	15
Tabela 4: Tabela com resultados dos ensaios de dureza dos diferentes discos virgens de aço H13 utilizados para os ensaios tribológicos.	16
Tabela 5: Resultados dos EDS de ponto nos oito locais (Figura 17) em que foi realizado no pino ensaiado com adição de Cu 20 μ m. Resultados em porcentagem atômica.....	29
Tabela 6: Composição química das análises de EDS realizadas nos três diferentes pontos (Figura 25) da amostra ensaiada sem adição de meio interfacial.	37
Tabela 7: Tamanho médio da camada deformada para cada tipo de meio interfacial adicionado durante o ensaio pino contra disco.	47

Lista de Abreviaturas e Siglas

μ :	Coeficiente de atrito
Cu:	Cobre
EDS:	Espectroscopia de Energia Dispersiva
F:	Força de atrito
N:	Força Normal
μm :	Micrometro
MEV:	Microscópio eletrônico de varredura
nm:	Nanometro
HV:	Dureza Vickers
SEI:	Imagem de elétrons secundários

Sumário

1	Introdução	1
2	Objetivos	1
3	Revisão Bibliográfica	2
3.1	Coeficiente de atrito	2
3.2	Desgaste.....	3
3.3	Lubrificantes sólidos	4
3.4	A tribologia e sua importância.....	5
3.5	Camadas tribológicas	8
3.6	Ensaio do pino contra disco.....	9
4	Materiais e métodos	11
4.1	Materiais	11
4.2	Métodos	13
4.2.1	Ensaio tribológicos	13
4.2.2	Caracterização microestrutural	13
4.2.3	Ensaio de dureza Vickers dos pinos e discos	14
5	Resultados	18
5.1	Ensaio tribológicos	18
5.2	Medição e caracterização das camadas endógenas e exógenas próximas à superfície dos pinos.....	20
5.2.1	Pino virgem	20
5.2.2	Pino ensaiado com adição de Cu 400µm.....	22
5.2.3	Pino ensaiado com adição de Cu 20µm.....	26
5.2.4	Pino ensaiado com adição de grafite.....	32
5.2.5	Pino ensaiado sem adição de partículas.....	34

5.3 Microanálise química das diferentes camadas superficiais (endógenas e exógenas).....	39
5.4 Mapeamento de raios-X.....	39
5.4.1 Disco ensaiado com adição de Cu 400µm.....	39
5.4.2 Disco ensaiado com adição de grafite.....	41
5.4.3 Disco ensaiado sem adição de meio interfacial	43
6 Discussão.....	45
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	48
7 Conclusões.....	49
8 Bibliografia.....	49

1 Introdução

Segundo (Rahnejat, 2010) existe uma necessidade crescente de preservar as reservas energéticas naturais que sempre decrescem, principalmente os combustíveis fósseis. A taxa com que esses recursos são consumidos é muito maior que a sua renovação na natureza. Alguns setores, como o de transportes, sempre utilizarão esses recursos mesmo que parcialmente. Isso ocorre apesar de se saber que existe a necessidade emergencial de se encontrar novas fontes energéticas.

O uso eficiente desses preciosos ativos naturais nunca foi tão importante como hoje em dia. O desafio para diminuir a taxa de consumo desses combustíveis irá afetar todas as áreas da ciência e da engenharia. Uma disciplina chave que será afetada é a tribologia, a ciência da fricção, desgaste e lubrificação. Com o desenvolvimento do conhecimento humano, houve um avanço no entendimento dessa ciência que parecia extremamente empírica. Tribologia é uma das peças fundamentais na busca pela eficiência, preservação de recursos e conservação do meio ambiente. Essas nobres causas nos levaram a analisar fenômenos desde a escala macroscópica até a escala mais diminuta (Rahnejat, 2010). A tribologia não pode ser vista como uma disciplina independente já que existem diversos fenômenos em muitas áreas da ciência que interagem com ela alterando o seu resultado. Por esse motivo pode ser considerada como uma parte limitada da física que analisa os movimentos (Rahnejat, 2010).

2 Objetivos

O objetivo do trabalho foi medir e caracterizar com auxílio de microscopia eletrônica e de microanálise EDS a espessura da região deformada plasticamente de pinos usados em ensaios pino contra disco com acréscimo de diferentes meios interfaciais: cobre com diferentes granulometrias (400 μ m, 20 μ m), grafite particulado, além de um ensaio sem meio interfacial para servir de referência. Relacionaram-se esses dados com os coeficientes de atrito obtidos através dos ensaios tribológicos.

3 Revisão Bibliográfica

3.1 Coeficiente de atrito

O atrito se define como a resistência desenvolvida por um corpo em contato com outro ou outros quando estes realizam ou tendem a realizar um movimento relativo entre si. Do ponto de vista energético o atrito é a conversão de energia cinética em outra forma de energia, por exemplo: térmica, acústica, mecânica, elétrica. Essa energia depende da natureza dos corpos envolvido e do tribofilme formado entre eles (Bayer, 1994). Os dois principais mecanismos de atrito são a adesão e a deformação plástica. A princípio, a energia de atrito é dissipada na deformação das camadas superficiais por mecanismos elásticos, plásticos e viscoelásticos e pela formação de trincas nessas camadas. Pode ainda haver a participação de outros corpos em contato com ambas as superfícies, como é o caso dos lubrificantes (Holmberg, et al., 2009). O coeficiente de atrito (grandeza adimensional) representado quase sempre pela letra μ , relaciona a força de atrito com a força normal entre os corpos em contato (vide Equação 1). Esse coeficiente também depende da natureza dos corpos em contato uns com os outros (Holmberg, et al., 2009).

$$\mu = \frac{F}{N}$$

Equação 1: Coeficiente de atrito relaciona a força de atrito com a força normal entre os corpos

Podem-se dividir as forças de atrito em dois grupos: as forças de atrito estático e cinético. A força de atrito estático pode ser caracterizada pelo atrito entre corpos que não realizam movimento relativo entre si. Já a força de atrito cinético que também leva o nome de força de atrito dinâmico é força característica gerada a partir do contato entre corpos que apresentam movimento relativo entre si (Bayer, 1994). De uma maneira moderna pode-se descrever o atrito como uma variável que depende de parâmetros que envolvem o tribosistema como velocidade relativa, pressão de

contato, presença de lubrificantes, umidade, temperatura, filmes superficiais e propriedades dos substratos (Bayer, 1994).

O atrito microscópico é causado pela quebra de ligações entre átomos que podem estar fortemente ligados ou apenas em contato por microssaliências na superfície do material. Por mais liso que o material possa parecer a olho nu, ainda existem asperezas superficiais na escala macroscópica (Kim, 1991). A quebra dessas microligações ocorre depois de uma deformação plástica em um ponto de contato entre as superfícies em que as ligações são mais fracas (Kim, 1991). Novos métodos de análise de superfície assim como métodos de análise de forças atômicas abriram um novo caminho para que se estude o atrito e suas forças em escala molecular, também o avanço dos processadores e programas de computador ajuda a simular as relações atômicas entre os objetos em contato e a forma com que adquirem movimento relativo entre si (Holmberg, et al., 2009).

3.2 Desgaste

O desgaste é frequentemente definido como a perda de material da superfície sólida devido ao movimento relativo com outra superfície sólida como a qual mantinha contato. Em um sistema tribológico bem elaborado essa perda de material, apesar de constante, é bem lenta e controlada. Apesar do desgaste e do atrito serem medidos em ensaios tribológicos, sua inter-relação ainda não é muito bem compreendida. O desgaste é um fenômeno complexo. É difícil classifica-lo e encontrar na literatura soluções reais para problemas práticos (Bhushan, et al., 1997). Apesar de não ser uma regra, um desgaste elevado é comumente associado a um atrito elevado e vice versa. Outro contra censo é o fato do coeficiente de desgaste mudar em várias ordens de grandeza, dependendo das condições do meio, enquanto que o coeficiente de atrito não muda tanto, ao menos que se adicione algum tipo de lubrificante (Holmberg, et al., 2009). Os modos pelos quais o material é removido da superfície de contato são chamados de mecanismos de desgaste. Observa-se normalmente a ocorrência de mais de um mecanismo ao mesmo tempo e a combinação da ocorrência desses mecanismos é ditada pelas condições de contato entre as superfícies. Os principais

mecanismos de desgaste são: adesivo, abrasivo, fadiga e desgaste químico (Holmberg, 1991).

O desgaste abrasivo se caracteriza pelo fato de uma das superfícies envolvidas no sistema ser mais dura que a outra ou quando um terceiro corpo (abrasivo) é introduzido no meio das superfícies mais moles. Assim essa partícula ou superfície mais dura acaba limando as asperezas das superfícies mais moles criando diferentes marcas e arranhões nessas superfícies. As marcas formadas dependem da geometria desse terceiro corpo ou da geometria da superfície mais dura (Holmberg, et al., 2009). O desgaste abrasivo muda a microestrutura próxima à superfície, ele gera tensões internas e discordâncias devido à deformação plástica dessa superfície que está sendo atritada. Isso faz com que a superfície deformada plasticamente e desgastada fique encruada e mais resistente ao desgaste. Esse fato, associado à oxidação das tribosuperfícies, leva a formação de um filme muito fino que contém partículas encontradas no ambiente junto com pedaços desbastados das superfícies que estão sendo atritadas. A formação desse filme pode até chegar a mudar a composição química das regiões mais próximas a superfície (Rigney, 1984).

3.3 Lubrificantes sólidos

A maneira mais comum de se reduzir tanto o atrito quanto o desgaste é através da introdução de um lubrificante entre as duas superfícies que se movimentam. Se o lubrificante consegue evitar o contato das duas superfícies, a força de cisalhamento que causa resistência ao movimento e estresse no material terá que mover o lubrificante contra ele mesmo ou uma das superfícies contra a o lubrificante. Os lubrificantes podem ser divididos em diferentes grupos e essa divisão não é muito clara (Holmberg, et al., 2009). Os lubrificantes apresentam-se normalmente na forma de pó ou flocos, mas agem da mesma maneira que um lubrificante líquido. Inibem o contato direto entre as duas superfícies que deslizam e permitem que a força de cisalhamento haja em uma das superfícies sendo ela o lubrificante e não a superfície do material.

Lubrificantes com estrutura lamelar são muito eficientes pelo fato de facilidade o deslizamento entre as lamelas. Entre esses materiais encontram-se o bissulfeto de

molibdênio, grafite, ácido bórico, entre outros. O coeficiente de atrito típico entre sólidos na presença de lubrificantes sólidos varia de $\mu=0,05-0,25$ (Holmberg, et al., 2009). No caso do grafite o atrito entre suas lamelas quando elas tentam deslizar paralelamente uma contra a outra é aparentemente baixo. São superfícies de baixa energia e apresentam baixa aderência. Já as bordas dessas lamelas são locais de alta energia e fortemente ligados a outras bordas ou planos basais. Quando o deslizamento ocorre, bordas são expostas, deste modo o módulo de atrito do grafite no vácuo é alto. Vapores condensados diminuem a fricção adsorvendo seletivamente nas bordas de alta energia saturando as ligações e diminuindo a capacidade de adesão dessas bordas, diminuindo a fricção. Somente uma pequena quantidade de moléculas adsorvidas é necessária para causar esse efeito. (Bhushan, 2013).

Os lubrificantes sólidos são usados em situações nas quais os lubrificantes líquidos apresentam limitações. Como nas seguintes condições: vácuo, temperaturas extremamente quentes ou frias, presença de radiação, pressões extremas causadas pelo contato, entre outras. Existem desvantagens no uso desse tipo de lubrificante: baixa capacidade de condução térmica, maior dificuldade de acesso do lubrificante ao local que deve ser lubrificado quando comparado com lubrificantes líquidos e comportamento químico e físico instável quando está sendo friccionado o que afeta seu comportamento tribológico. Os lubrificantes sólidos também podem ser utilizados dispersos em água, óleo ou graxa. Assim se obtém propriedades combinadas entre lubrificantes sólidos e líquidos (Holmberg, et al., 2009).

3.4 A tribologia e sua importância

Segundo o Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa (1986) o prefixo tribo- se refere à palavra grega “tribos”. Que significa “ação de esfregar” ou “atrito”. Assim a tribologia é a ciência de fricção ou a ciência do atrito. Outros dicionários definem tribologia como a ciência e tecnologia de superfícies que interagem em movimento relativo entre si. Segundo (Bhushan, 2013) tribologia é a arte de aplicar análises operacionais a problemas de grande importância econômica, onde estão envolvidas, confiabilidade, manutenção e desgaste de equipamentos técnicos desde eletrodomésticos até naves espaciais. A interação das superfícies tribológicas é de

complexidade elevada. Seu entendimento requer a compreensão de várias disciplinas: física, química, matemática aplicada, mecânica dos sólidos, mecânica dos fluidos, termodinâmica, transferência de calor, ciência dos materiais, reologia, lubrificação, desenho de máquinas, desempenho e confiabilidade.

A tribologia desempenhou um papel central nos primórdios da evolução tecnológica. Reduzir a fricção com o uso da roda possibilitou ao homem ir mais longe e mais rápido, a lubrificação de trenós possibilitou o transporte de blocos de construção possibilitando-se assim erguer construções maiores. Junto com um conhecimento tribológico, o uso do metal como material de construção e o óleo como lubrificante suavizaram o caminho para a revolução industrial e possibilitaram novas invenções como rolamentos e engrenagens capazes de suportar cargas elevadas, com baixo atrito. Esses foram componentes cruciais na criação de equipamentos e máquinas de alta potência (Holmberg, et al., 2009).

Nos maquinários modernos que utilizam superfícies rolantes e deslizantes, a tribologia é essencial. Existe uma crescente necessidade de controlar a fricção e o desgaste por diversas razões: aumento da vida útil de máquinas e sistemas biológicos, aumento da eficiência de engrenagens e equipamentos, desenvolvimento de produtos mais avançados, conservação de materiais escassos, diminuição do consumo de energia e aumento da segurança. Historicamente essas necessidades foram alcançadas através de mudanças de projetos, seleção de materiais mais adequados ou utilização de técnicas de lubrificação. O uso de materiais apropriados pode envolver o uso de cerâmicas e polímeros. Já as técnicas de lubrificação incluem o uso de óleos minerais e sintéticos ou lubrificantes sólidos como bissulfeto de molibdênio (Holmberg, et al., 2009).

Os tribologistas vem aumentando o uso de novas abordagens para fricção e controle do desgaste, como o tratamento de superfícies e revestimentos. Isso tem levado ao crescimento de uma nova disciplina chamada engenharia de superfícies. Esse crescimento tem sido impulsionado por dois fatores principais: o descobrimento de novos revestimentos e métodos de tratamento superficiais que possibilitaram alcançar características de revestimentos e propriedades triboquímicas antes inalcançáveis e o reconhecimento por parte dos engenheiros de que a superfície é muitas vezes a parte mais importante de muitos componentes de engenharia. É na superfície que muitas falhas se originam assim como desgaste, fadiga e corrosão. A superfície tem

uma importância fundamental na vida útil, no custo, no desempenho e manutenção de equipamento (Holmberg, et al., 2009).

De acordo com algumas estimativas, o custo do desconhecimento da tribologia nos EUA é de cerca de 4% do seu produto interno (algo em torno de U\$200 bilhões de dólares em 1966). Um terço dos recursos energéticos é despendido como atrito de uma ou outra forma. A redução da fricção e o controle do desgaste são fatores econômicos e de confiabilidade que não podem ser subestimados. Exemplo de atrito produtivo: freios, embreagens, rodas motrizes em trens e automóveis, parafusos e porcas. Exemplo de desgaste produtivo: ação de escrever com um lápis, usinagem, polimento. Exemplos de fricção e desgaste improdutivo: combustão interna, motores de aeronaves, engrenagens, rolamento e vedação (Bhushan, 2013).

A tribologia não é apenas importante para a indústria pesada, ela também afeta o nosso dia-a-dia. Escrever, por exemplo, é um processo tribológico. Quando se escreve, espera-se que a tinta da caneta ou o grafite do lápis se transfira controladamente para o papel. Durante a escrita a caneta ou o grafite deve ter boa adesão à superfície e o grafite deve ter, por exemplo, rigidez e dureza para que não frature. O objetivo ao barbear-se é remover os pelos com a maior eficiência causando o menor desconforto possível para a pele. Nesse processo o creme de barbear funciona como um lubrificante entre a pele e a lâmina do barbeador. A fricção é muito importante ao se andar ou ao dirigir um automóvel. O atrito faz com que não patinemos e consigamos nos locomover. A tribologia também é importante nos esportes, pois as roupas esportivas devem ter um baixo atrito com a pele humana e alguns materiais, como os esquis, devem ter baixo atrito com o gelo e neve permitindo que eles deslizem (Holmberg, et al., 2009).

As articulações humanas são outro exemplo no qual a tribologia é importante. Elas devem estar lubrificadas para evitar a fricção e assim obter um baixo desgaste, evitando as artrites. As cartilagens presentes nas articulações proveem uma superfície com baixo coeficiente de atrito além de serem lubrificadas com fluidos que contêm lubrificantes e lipídios. Saliva é mais um exemplo, juntamente com outros fluidos bucais se mistura com o alimento e facilita o transporte dele pelo canal digestivo (Holmberg, et al., 2009).

Sabe-se há muitos anos que reações triboquímicas na superfície de contato são críticas em muitos sistemas tribológicos. Muito frequentemente isso leva a formação de compostos estáveis após certo período em que as superfícies se atritam, essa camada formada é que rege a fricção e desgaste subsequente. Isso ocorre em aplicações diversas como corte e deslizamento lubrificado. Nas etapas posteriores se encoraja a formação de compostos específicos na interface. Técnicas de engenharia avançada permitem o projeto e a produção de compostos como camadas superficiais prévias ao uso, garantindo controle sobre o sistema tribológico (Holmberg, et al., 2009).

3.5 Camadas tribológicas

Um grande desafio é encontrar um parâmetro que consiga expressar a rugosidade da superfície em um sistema tribológico, levando-se em conta o atrito e o desgaste do sistema. Outro fator que deve ser levado em consideração, caso exista, são os lubrificantes sólidos e a forma como eles se distribuem pela topografia da amostra (Holmberg, 1984). Essa dificuldade é devida ao fato de superfícies tribológicas apresentarem uma rugosidade aleatória e essa rugosidade se alterar durante o período que ela se atrita com outra superfície. Quando duas superfícies entram em contato uma com a outra, a primeira coisa que se encosta são os picos mais altos das duas superfícies. Assim, quando duas superfícies metálicas são forçadas uma contra a outra apenas cerca de 10% da área superficial realmente chega a entrar em contato com a outra superfície (Holmberg, et al., 2009).

A superfície de um material metálico depende da composição química e física desse material, assim como da região que está ao seu redor. Uma superfície que foi usinada tem estrutura diferente de uma superfície que não sofreu qualquer tipo de conformação ou trabalho mecânico. A energia aplicada na superfície do material durante a usinagem pode leva-lo a deformar, encruar e recristalizar (Holmberg, et al., 2009).

Esses esforços aplicados na superfície do material podem levar a formação de uma camada deformada, o tamanho típico de uma camada deformada varia em torno de 10-100 μm . Existe também uma camada levemente deformada com espessura de 10-

100 μm , assim como camadas formadas pelas reações químicas na superfície que dependem do meio no qual a superfície está, do tempo de reação e da temperatura. Essa camada tem cerca de 10-100 nm (Holmberg, et al., 2009). Existem também camadas formadas pela adsorção química e física. Essas camadas podem ter uma dimensão atômica, mas sua espessura chega a alcançar 5 nm (Holmberg, et al., 2009). A Figura 1 (Bhushan, 2013) ilustra as camadas descritas acima. Por fim se define tribofilme como uma camada fina sólida gerada como consequência do movimento relativo de duas superfícies em contato, essa camada é aderida a camada deformada, mas tem diferente composição química, estrutura e comportamento tribológico (Wang, et al., 2013).

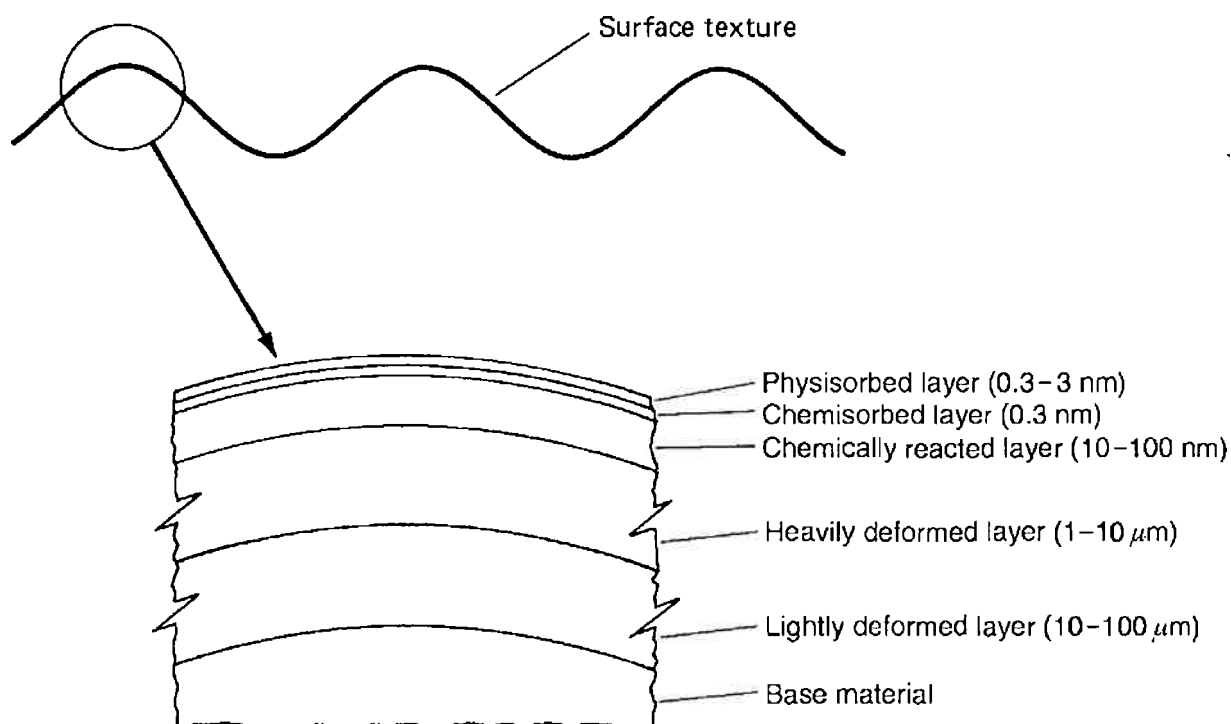


Figura 1: Detalhes e especificações das camadas típicas e suas espessuras.

3.6 Ensaio do pino contra disco

O teste de desgaste foi escolhido de modo que suas características se relacionem com os problemas apresentados na vida real. Assim podem ser feitas avaliações

corretas e pertinentes dos resultados obtidos (Kennedy, et al., 1998). O desgaste ocorre em todo tipo de superfícies até nas mais duras como o diamante. Os estudos feitos sobre o desgaste preocupam-se mais com a deformação plástica, mecanismos de remoção de material, fratura frágil e propriedades químicas do tribofilme. Com o surgimento de novos materiais de engenharia surge uma necessidade de se avaliar as propriedades tribológicas de suas superfícies assim como a combinação de camadas de revestimento. Muitos estudos são feitos buscando avaliar os efeitos da abrasão, erosão e impacto. Normalmente cada um desses aspectos é estudado de forma separada. Recentemente foram padronizados e desenvolvidos testes para se avaliar a resistência ao desgaste. Testes como o pino em disco é largamente utilizado para simular a ocorrência do atrito que causa deformação plástica em uma direção específica durante todo o teste (Kennedy, et al., 1998). A Figura 2 mostra esquematicamente o ensaio pino em disco, no qual o pino fixo e carregado desliza sobre um disco que roda (Kato, 2003).

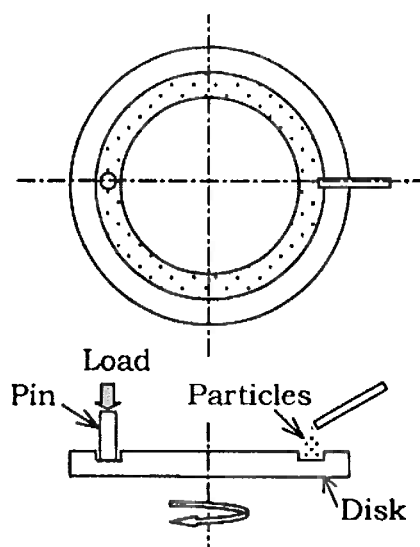


Figura 2: Esquema de um ensaio pino em disco.

Quando se desliza duas superfícies metálica uma contra a outra, observa-se a transição de desgaste severo para desgaste suave. No desgaste suave a superfície do metal é coberta por uma superfície de óxidos que previnem o contato intermetálico, resultando em um baixo coeficiente de atrito (Kato, 2003). Segundo Haertel (W. Haertel Jr., 2013), após o ensaio, quando se analisa a quantidade de material que foi

transferida do pino para o disco pode-se concluir se o regime foi severo ou suave. Quando o desgaste é severo encontra-se uma camada fina e descontínua de material do pino na superfície do disco e quando o desgaste é suave encontra-se uma camada relativamente grossa e contínua. Isso se deve pelo fato do desgaste severo dificultar a formação dessa camada.

4 Materiais e métodos

4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a realização dos ensaios foram discos de aço AISI H13 no estado recozido com diâmetro de 70 mm e uma pista de 3 mm de profundidade e 7 mm de largura. A Figura 3 contém as medidas de um disco igual ao que foi utilizado no ensaio. Essas medidas foram obtidas com um paquímetro. Os pinos de aço AISI 4140 com microestrutura de martensita revenida e 4,8 mm de diâmetro. Na Tabela 1 está descrita a composição química do pino e do disco utilizados no ensaio.

Tabela 1: Composições químicas nominais do pino e do disco em porcentagem atômica.

Peça	Aço	C (at%)	Mn (at%)	Si (at%)	P (at%)	S (at%)	Cr (at%)	Mo (at%)	V (at%)	Ni (at%)	Cu (at%)
Pino	4140	0,37	0,78	0,23	0,014	0,005	1,07	0,19	-	0,02	0,01
Disco	H13	0,39	0,34	0,97	0,02	0,001	5,18	1,24	0,99	-	-

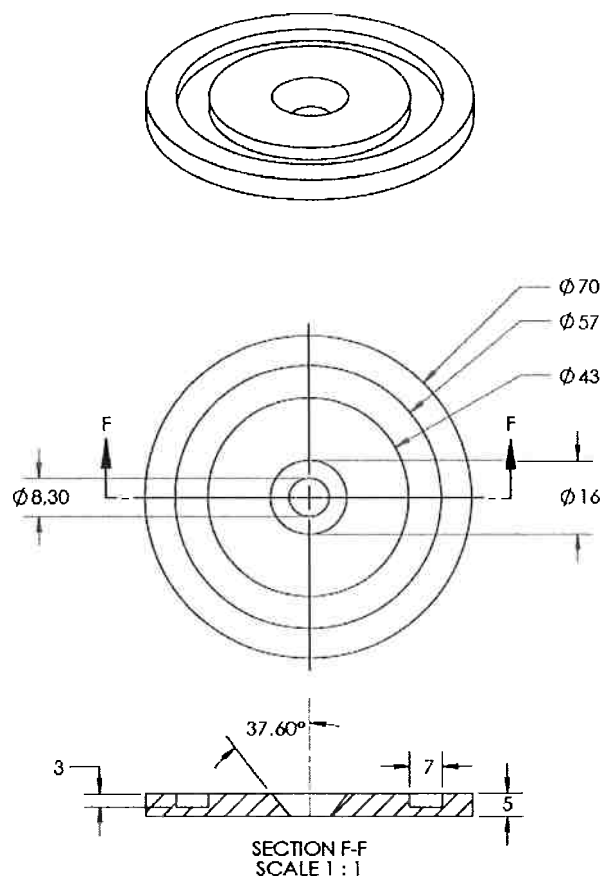


Figura 3: Dimensões em milímetros do disco utilizado nos ensaios.

Os meios que foram adicionados para formar cada sistema tribológico estão descritos na Tabela 2 que contém sua descrição, granulometria e códigos pelos quais serão tratados daqui em diante. Os cobres de duas granulometrias diferentes foram comprados da Sigma Aldrich e o grafite particulado foi doado pela Comercial de Peças de Grafite S.A.

Tabela 2: Descrição e detalhes dos diferentes materiais que foram adicionados no ensaio pino contra disco.

Código	Descrição	Granulometria
Cu400m	Cobre Particulado	até 400 μm
Cu20m	Cobre Particulado	14 a 25 μm
Gra25m	Grafite particulado	25 μm

4.2 Métodos

4.2.1 Ensaio tribológicos

Os ensaios pino contra disco foram realizados em um tribômetro Plint & Patners. Inicialmente o pino foi ensaiado no próprio tribômetro contra lixas #180, #400 e #600. O pino é posicionado na parte interna da lixa circular e conforme a lixa começa a girar o pino se move lentamente para a parte mais externa da lixa, assim toda a lixa é usada de maneira uniforme para desgastar o pino. O objetivo do lixamento é aplainar a superfície do pino e deixá-la o mais paralelo possível em relação à superfície do disco. Depois de aplainados os pinos e os discos foram limpos em um banho ultrassônico imersos em álcool e dispostos no tribômetro para serem ensaiados. Cada ensaio teve duração de uma hora, carga normal à superfície de atrito de 10 N, velocidade de 0,5 m/s e temperatura ambiente de 25 ± 1 °C e durante o ensaio o coeficiente de atrito foi obtido a cada segundo com o auxílio do programa Compend 2000 versão 2,35. Nos ensaios com adição de meio particulado, esses foram adicionados à pista logo após o início do ensaio seguindo a metodologia utilizada por (Kato, 2003). Foram realizados os seguintes testes:

- Pino contra disco sem adição de meio interfacial.
- Pino contra disco com adição de 0,1 g de Gra25m (grafite).
- Pino contra disco com adição de 0,18 g de Cu20m (cobre particulado).
- Pino contra disco com adição de 0,18 g de Cu400m (cobre particulado).

4.2.2 Caracterização microestrutural

A partir de 1931, com a invenção do microscópio eletrônico por Max Knoll e Ernst Ruska na Escola Técnica Superior de Berlim, deu-se início a superação da limitação do uso da luz visível aumentando a resolução máxima que se obtinha na microscopia. Em meados dos anos 1960 começou-se a comercializar microscópios eletrônicos de varredura (MEVs) e a partir deste momento abriram-se novas portas para as ciências das matérias (Palucka, 2002). O microscópio eletrônico de varredura é composto

basicamente em uma fonte de elétrons (normalmente um filamento de tungstênio) que, quando aquecido, libera elétrons. Depois de serem emitidos e acelerados esses elétrons passam por lentes eletromagnéticas que direcionam e focalizam esse feixe que incide sobre a amostra liberando elétrons secundários assim como uma gama de radiações diferentes que, por sua vez, são captados por diversos sensores. Assim o MEV pode fornecer diversas imagens e informações como composições químicas, imagens da topografia da amostra, imagens de alta resolução entre outras. Utilizou-se o MEV modelo Philips XL-30 para se observar as camadas próximas à superfície de uma seção transversal de um pino podendo assim calcular o tamanho da camada deformada do pino durante os ensaios pino disco. A microanálise química EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectrometry*) foi usada para medir semi quantitativamente a composição química de áreas específicas dessas camadas presentes nos pinos após os ensaios tribológicos.

Também foram feitas microanálises químicas das superfícies dos discos ensaiados. O tempo de aquisição variou de 30 a 120 segundos, usando tensão aceleradora de 15 kV e *dead-time* entre 10 a 25%. Esta análise mostra um volume de aproximadamente $1 \mu\text{m}^3$, tem precisão por volta de 0,1% e não pode ser usada para elementos com números atômicos menores do que onze (sódio). Finalmente foram realizadas imagens dos mapas de raios-X. O mapa de raios-X é uma ferramenta do MEV que produz uma imagem da distribuição dos elementos químicos que constituem a amostra conforme a sua posição em uma imagem que está sendo analisada. São emitidos elétrons através do MEV que excitam os átomos da amostra. Como cada átomo emite uma radiação diferente, quando excitados, pode-se obter uma imagem dos elementos químicos e sua distribuição na região da amostra que está sendo analisada. Assim consegue-se observar regiões que concentram uma quantidade maior de certo elemento químico.

4.2.3 Ensaio de dureza Vickers dos pinos e discos

O ensaio de dureza Vickers foi inventado na Inglaterra em 1925. Consiste em um teste de dureza com um indentador em forma de pirâmide reta com base quadrada como mostra a Figura 4. Essa pirâmide é pressionada contra o material com uma carga pré-

determinada, existe duas gamas de cargas usadas: micro (10 g a 1000 g) e macro (1 kg a 100 kg). Cada um destes testes com diferentes cargas é regido por uma norma diferente. Depois que a carga foi aplicada contra a amostra por cerca de 10 a 15 segundos se mede as diagonais da endentação e assim se obtém a dureza da amostra (Cimm) (Instron).

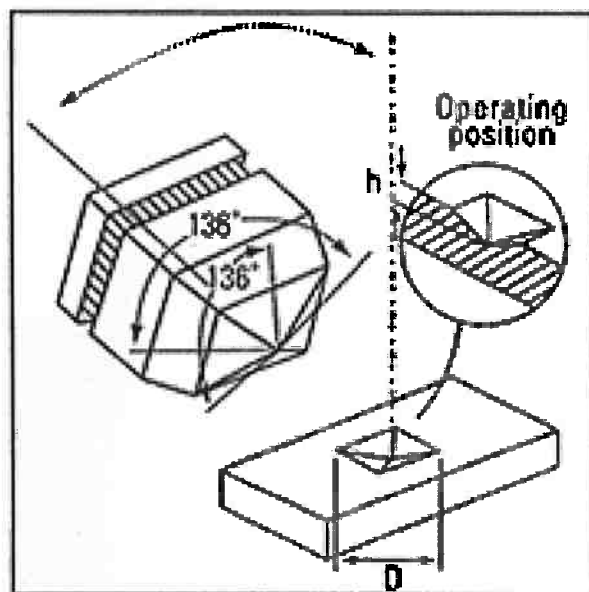


Figura 4: Forma do indetador Vickers (Instron).

Foram feitos três ensaios de dureza em cada disco e pino ensaiado além de outros testes em um disco e pino não ensaiado. Todos os testes foram feitos longe da região deformada plasticamente. Nos pinos os ensaios foram realizados no meio da seção transversal e nos discos eles foram realizados próximas à parte mais externa do disco, longe das bordas usinadas.

Os testes foram feitos com uma pré-carga de 300 gf em um medidor de dureza “Shimadzu Micro Hardness Tester – HMV-2 Series” calibrado pela última vez antes do ensaio no dia 26 de agosto de 2014 (ensaios realizados no dia 09 de outubro de 2014). Os resultados desses ensaios nos pinos e nos discos estão na Tabela 3 e Tabela 4 e nas Figura 5 e Figura 6.

Tabela 3: Tabela com resultados dos ensaios de dureza dos diferentes pinos de aço 4140 virgens utilizados para os ensaios tribológicos.

Pinos						
Medidas de dureza						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão	
Virgem	439	441	432	437,33	4,73	
Sem adição	455	434	458	449,00	13,08	
Cu 400	458	455	443	452,00	7,94	
Cu 20	446	450	450	448,67	2,31	
Cu nano	441	450	453	448,00	6,24	
Grafite	436	453	434	441,00	10,44	

Tabela 4: Tabela com resultados dos ensaios de dureza dos diferentes discos virgens de aço H13 utilizados para os ensaios tribológicos.

Discos						
Medidas de dureza						
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Média	Desvio Padrão	
Virgem	188	187	185	186,67	1,53	
Sem adição	190	193	195	192,67	2,52	
Cu 400	199	196	201	198,67	2,52	
Cu 20	201	202	194	199,00	4,36	
Cu nano	199	202	195	198,67	3,51	
Grafite	196	202	201	199,67	3,21	

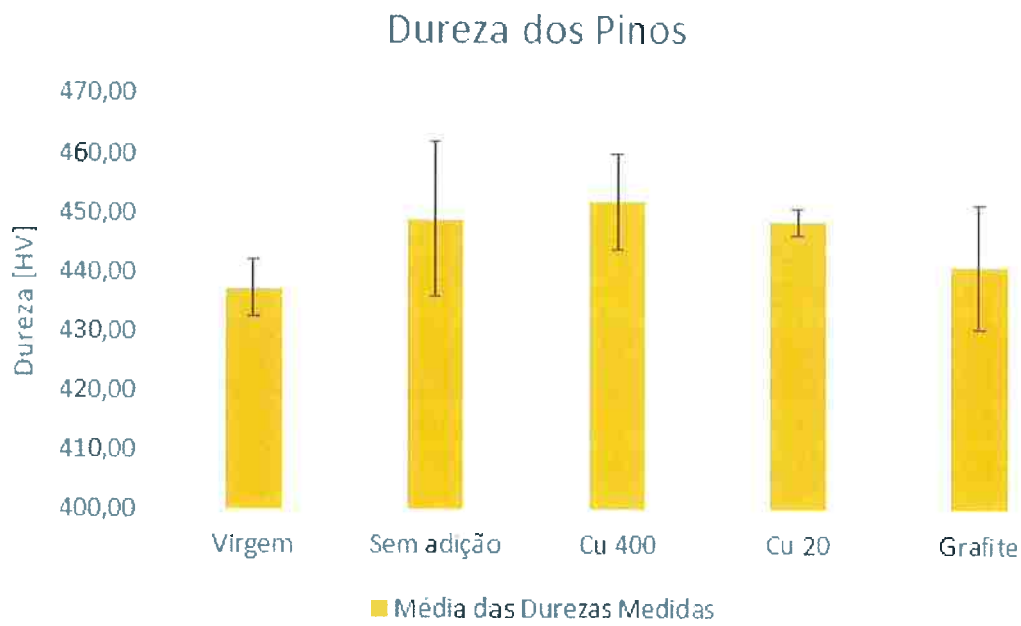


Figura 5: Gráfico dos resultados do teste de dureza e a dureza média dos pinos de aço 4140 virgens utilizados no ensaio pino contra disco.

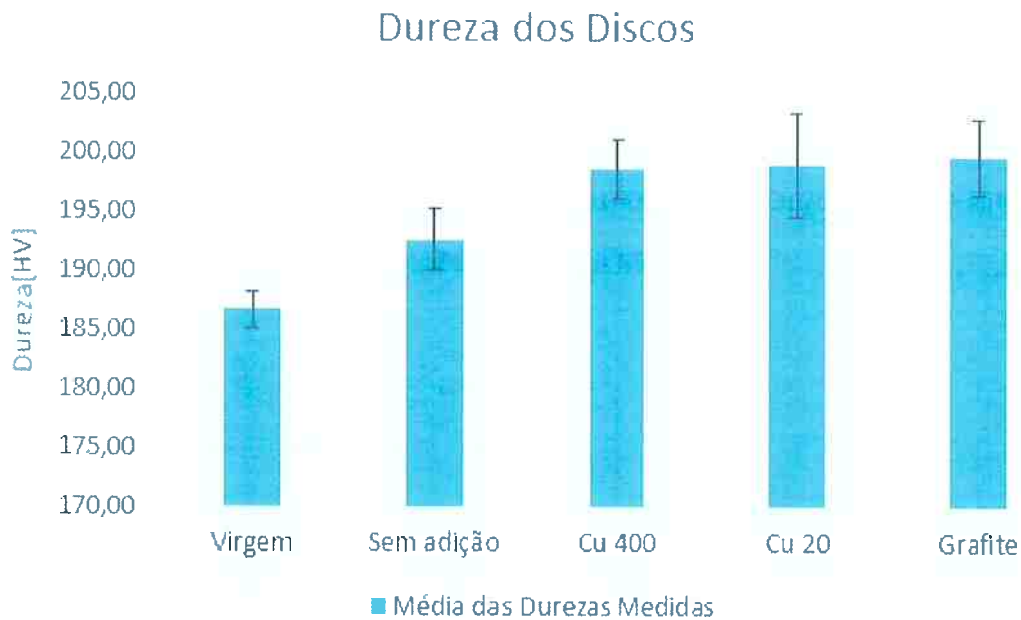


Figura 6: Gráfico do resultado do teste de dureza e a dureza média dos discos de aço H13 virgens utilizados no ensaio pino contra disco.

5 Resultados

5.1 Ensaio tribológicos

Durante o ensaio pino contra disco foi possível construir com os dados obtidos através do tribômetro, para cada ensaio, uma curva do coeficiente de atrito por distância percorrida pelo pino. A curva resultante de cada ensaio está apresentada na Figura 7. É importante ressaltar que tanto as curvas dos ensaios onde foram adicionados cobre 20 μ m, 400 μ m quanto à curva do ensaio onde não foi adicionado nenhum meio, atingiram o regime permanente. Já as curvas do ensaio em que se adicionaram grafite não atingiram esse regime. Nos ensaios onde foi adicionado cobre (nas duas granulometrias diferentes) o coeficiente de atrito se manteve durante quase todo o teste maior que o coeficiente de atrito onde não foi adicionado nenhum meio ao teste. Já o coeficiente de atrito, no ensaio em que foi adicionado grafite particulado, se manteve baixo apesar de sofrer uma alteração durante o período do ensaio, variando de 0,163 até 0,34.

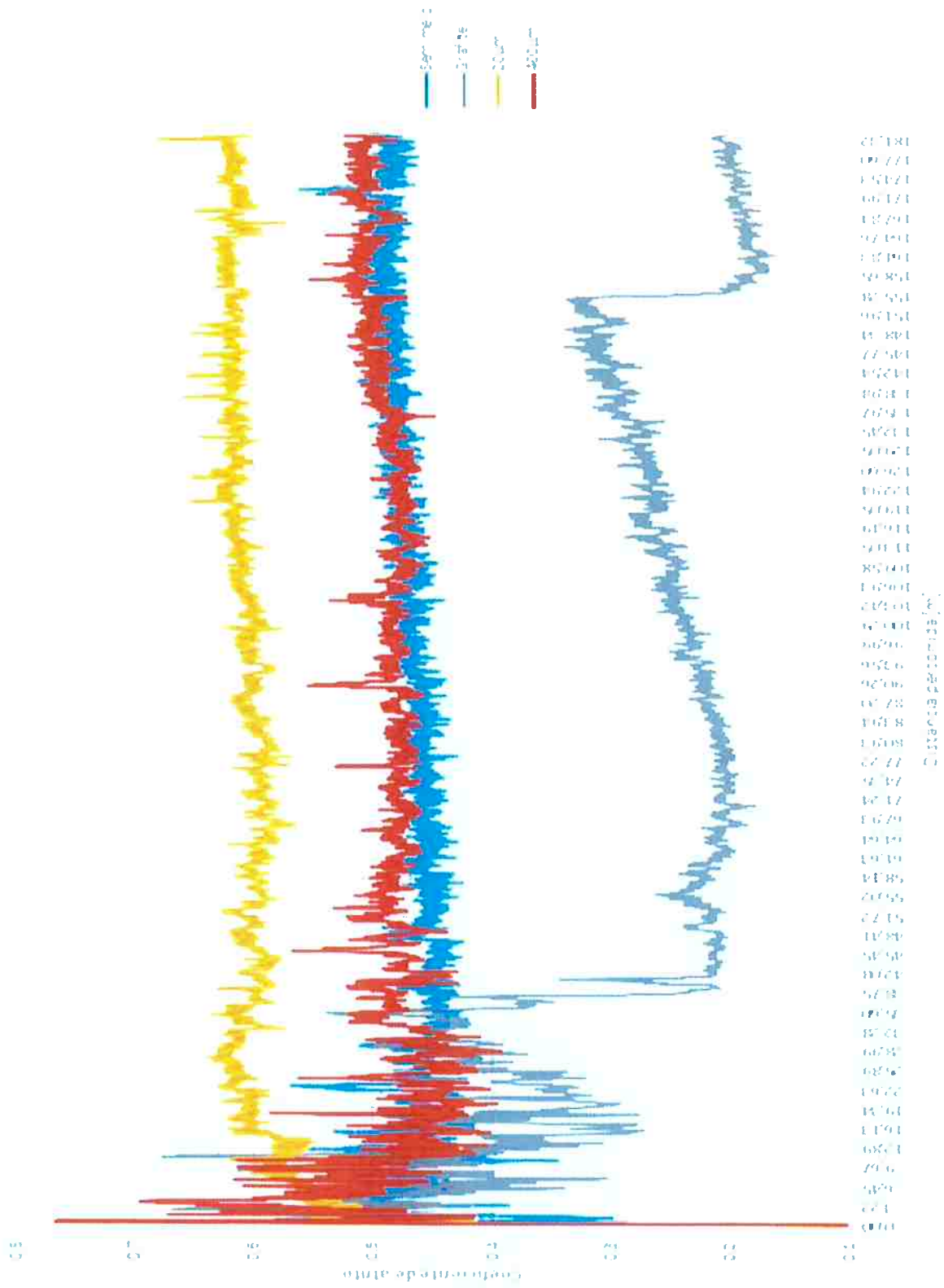


Figura 7: Gráfico da variação do coeficiente de atrito pela distância percorrida pelo pino nos diferentes ensaios.

5.2 Medição e caracterização das camadas endógenas e exógenas próximas à superfície dos pinos.

A espessura da camada endógena (deformada plasticamente) foi medida em quinze pontos com o mesmo espaçamento entre si nas imagens em que ela aparece ressaltada (Figura 12, Figura 18, Figura 22, Figura 26). As indicações presentes na imagem não representam os locais em que essas medições foram realizadas.

5.2.1 Pino virgem

Na Figura 8 observa-se uma seção longitudinal do pino com vários aumentos. Essas imagens mostram uma camada superficial relativamente plana por toda a superfície do pino mesmo variando seu aumento. Sua microestrutura é martensítica. A Figura 9 mostra com 1000 vezes de aumento uma região próxima à superfície de uma seção transversal do pino não ensaiado. Observa-se uma superfície plana e a ausência de deformação da microestrutura perto da superfície do pino de microestrutura martensítica.

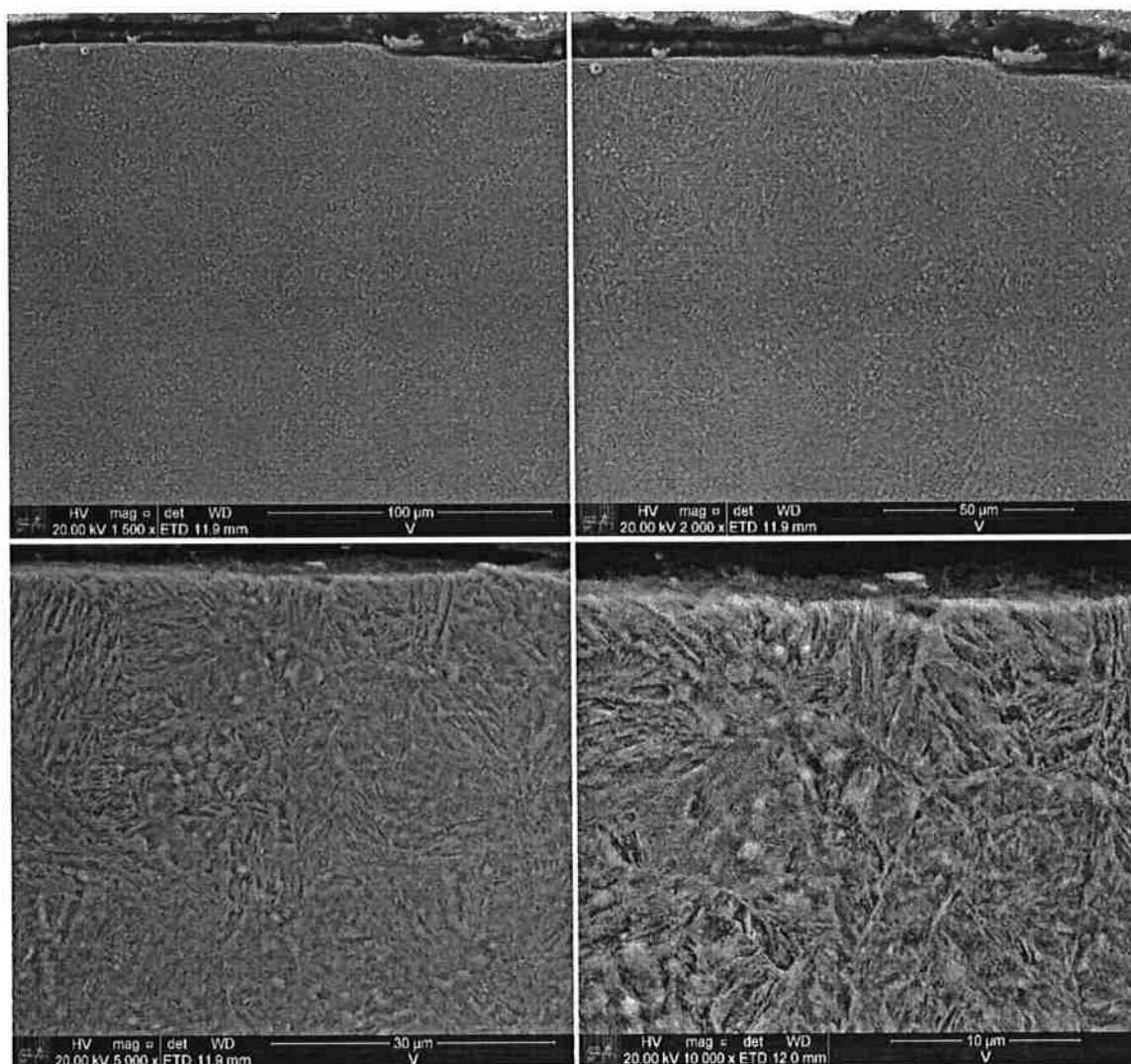


Figura 8: Detalhe da microestrutura martensítica do pino. Aumentos de 1500, 2000, 5000 e 10000 vezes. SEI-MEV.

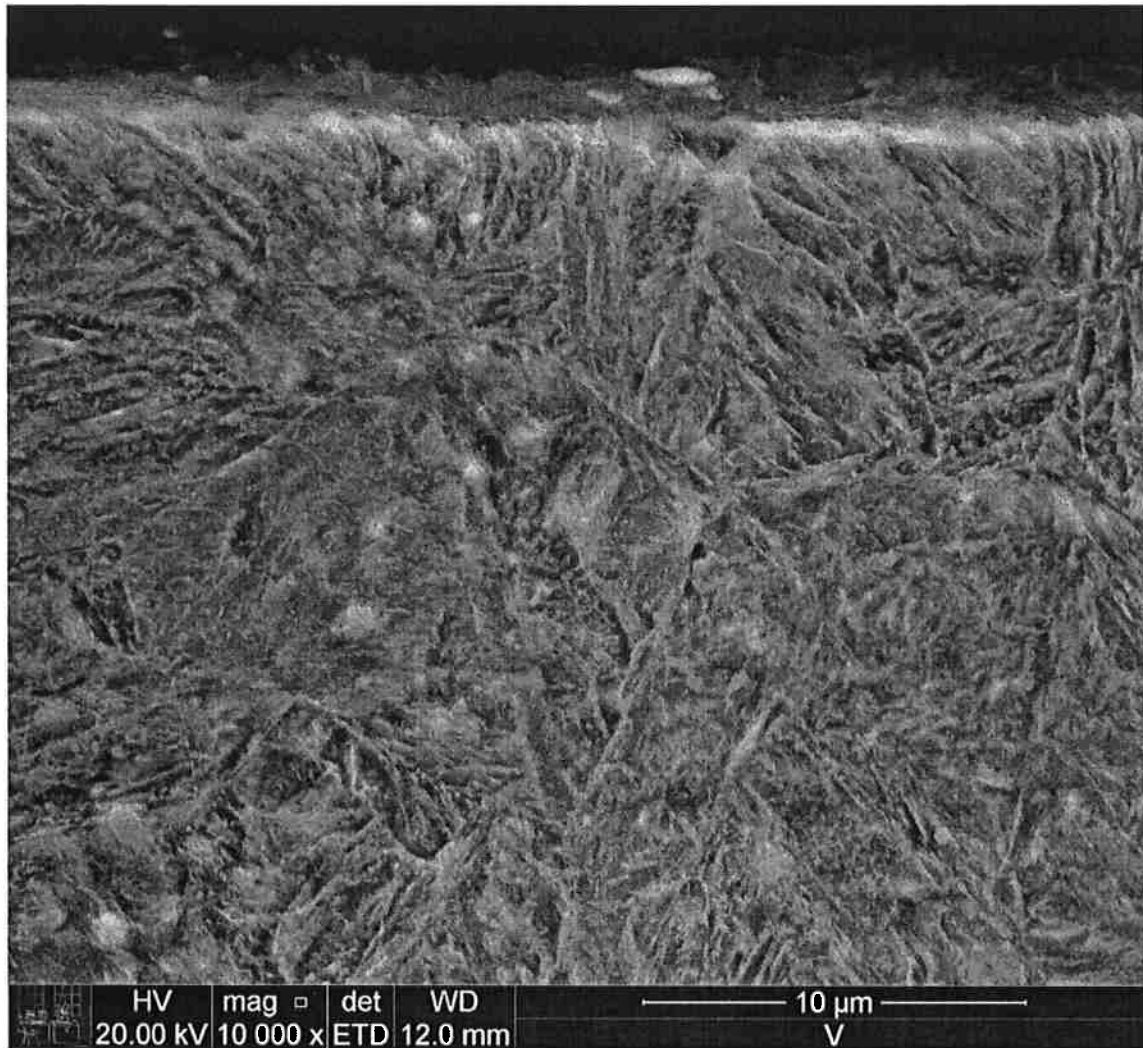


Figura 9: Detalhe da microestrutura martensítica do pino. Aumento de 10000 vezes. SEI-MEV.

5.2.2 Pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m.

O pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m foi envolvido em papel alumínio antes de ser embutido. O objetivo era preservar a camada de óxido, evitando o seu desprendimento durante o processo de lixamento e polimento. Na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** observa-se uma seção longitudinal do pino próxima a sua superfície com diferentes aumentos. Nessa sequência é possível observar a não homogeneidade da superfície do pino, isso fica claro nas imagens com menos aumento. Existem camadas endógena (debris e material de adição) e exógena (camada deformada plasticamente).

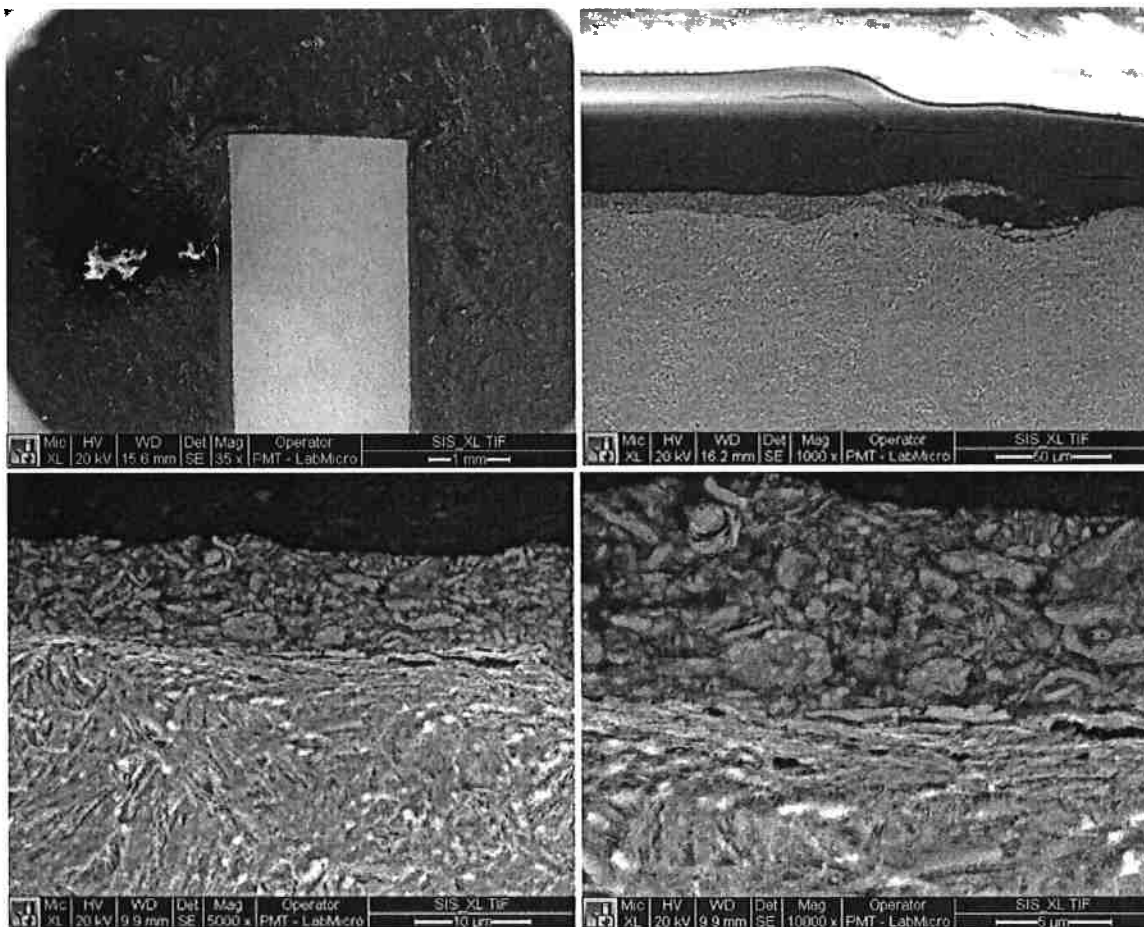


Figura 10 - Imagens de uma seção transversal do pino após ensaio com Cu 400 mm. Observa-se a heterogeneidade na formação de camadas superficiais exógenas e endógenas do pino, principalmente nas imagens com menor aumento. SEI-MEV.

Na Figura 12 são destacadas duas camadas: camada 1 e camada 2. Foi feito uma análise de EDS por ponto na camada 1 (Figura 11) e notou-se a presença de oxigênio. Isso leva a crer que a camada 1 seja uma camada de óxidos e a camada 2 seja uma camada deformada plasticamente. Também se mediu o tamanho dessas duas camadas o resultado encontrado foi que a espessura média da camada de óxidos (camada 1) é de $8,845\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,959\mu\text{m}$. Já a espessura média da camada deformada plasticamente (camada 2) é de $2,490\mu\text{m}$ com $1,042\mu\text{m}$ de desvio padrão.

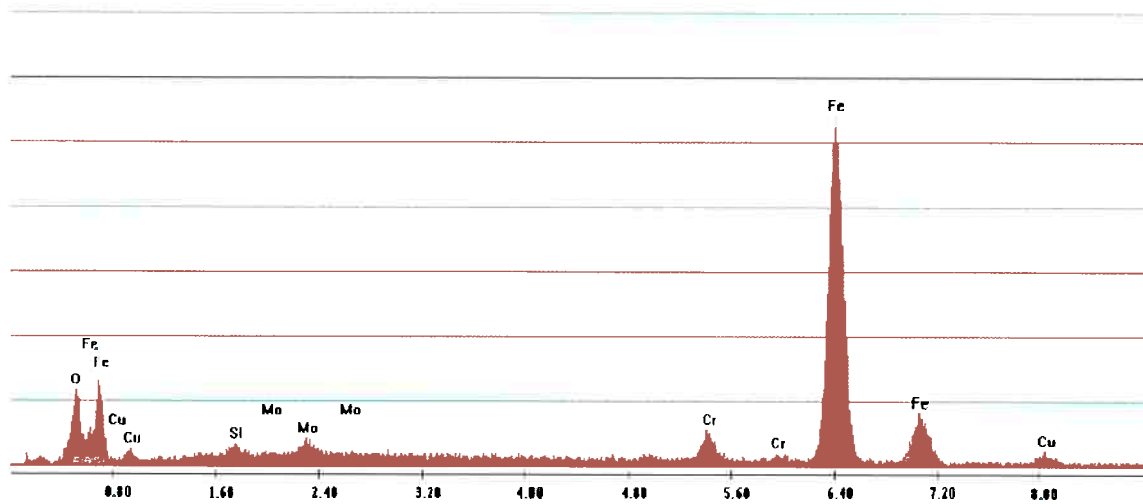


Figura 11: EDS por ponto realizado na camada 1 da Figura 12 indicando a presença de oxigênio (óxido de ferro) na análise.

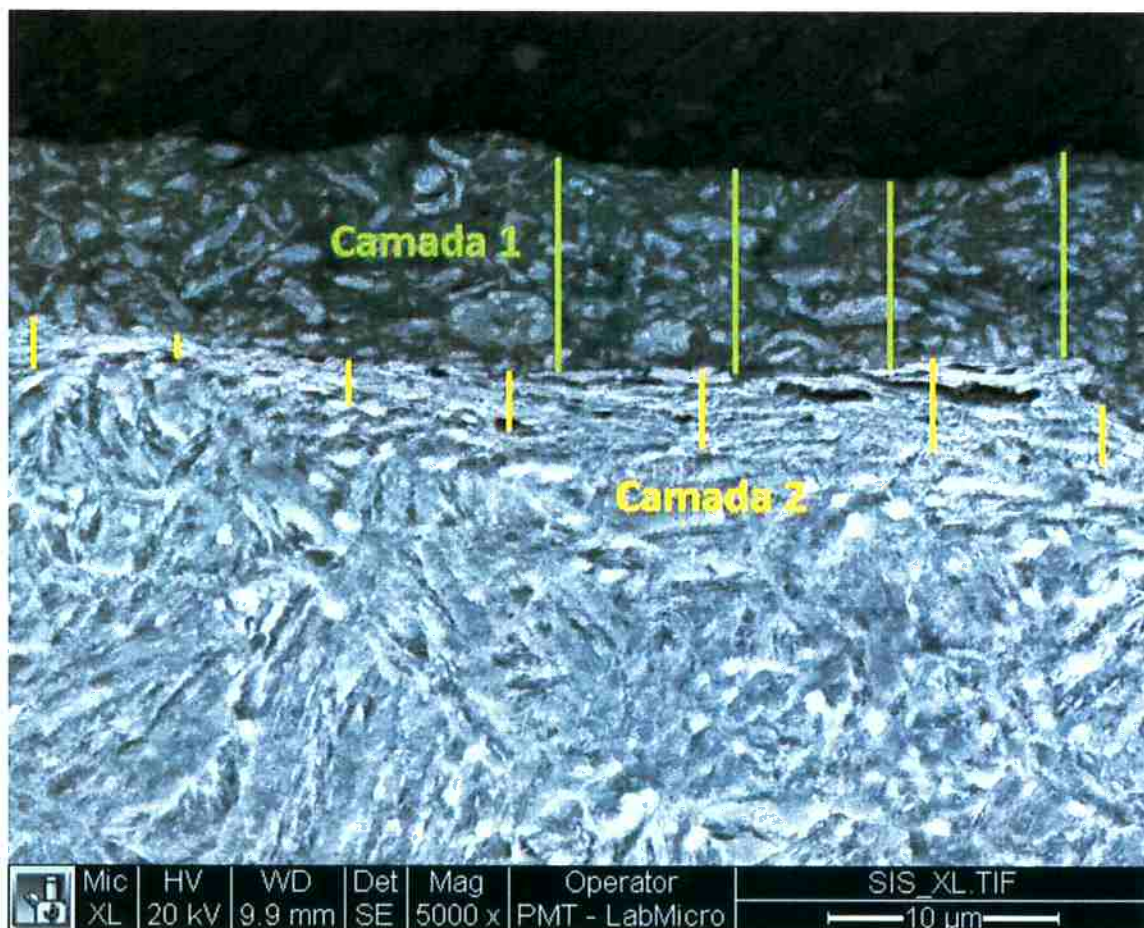


Figura 12: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400μm e em destaque suas camadas exógenas (óxido e debris, camada 1) e endógena (camada deformada plasticamente, camada 2, com presença de trincas). SEI-MEV.

A Figura 13 mostra uma região pouco deformada plasticamente, onde a camada de óxido é delgada e quase não se observa uma diferença de microestrutura perto da superfície do pino.

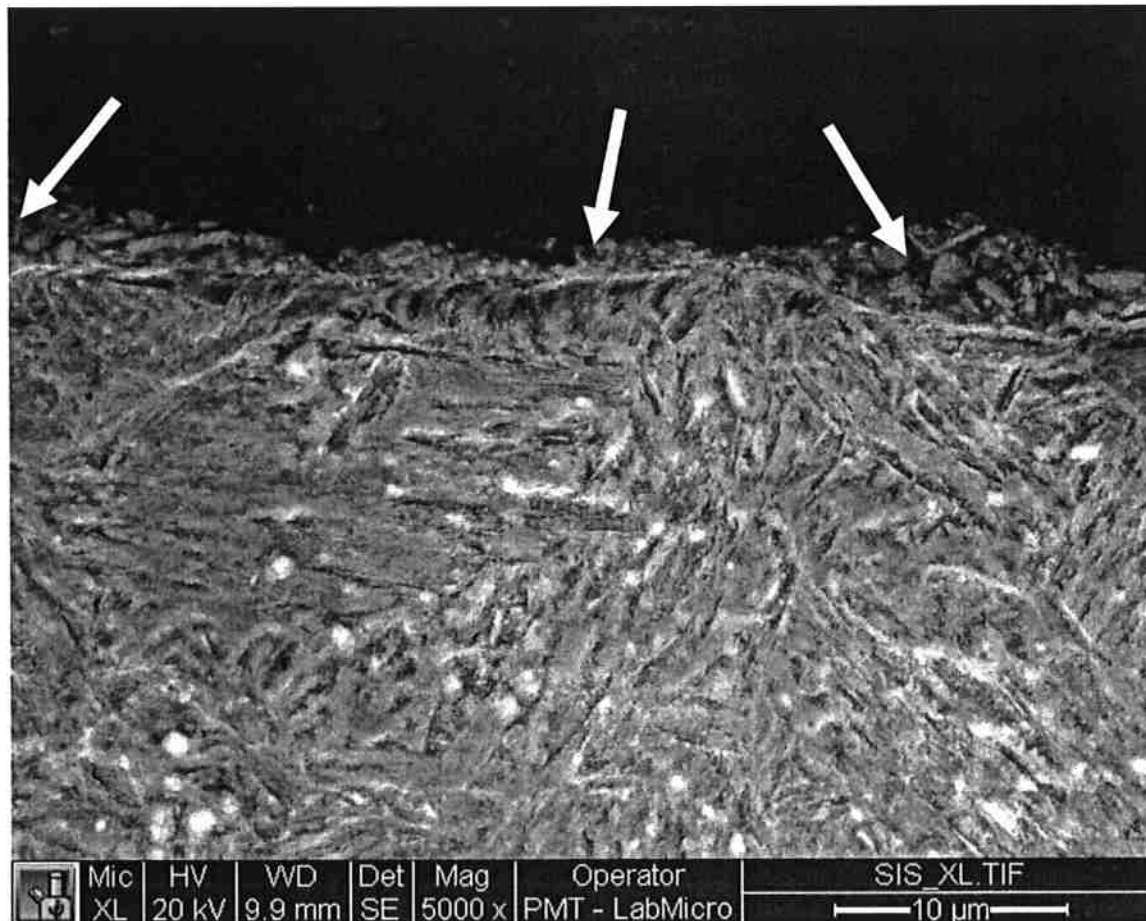


Figura 13: Imagem com 5000 vezes de aumento da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400μm na qual se está indicada uma camada pequena e irregular de óxido e quase não se observa a presença de camada deformada plasticamente. SEI-MEV.

Já a Figura 14 mostra uma região deformada plasticamente com presença de trincas (indicadas pelas setas A) no lado esquerdo e direito da imagem além de um pedaço quase completamente destacado no centro do vale (indicado pela seta B).

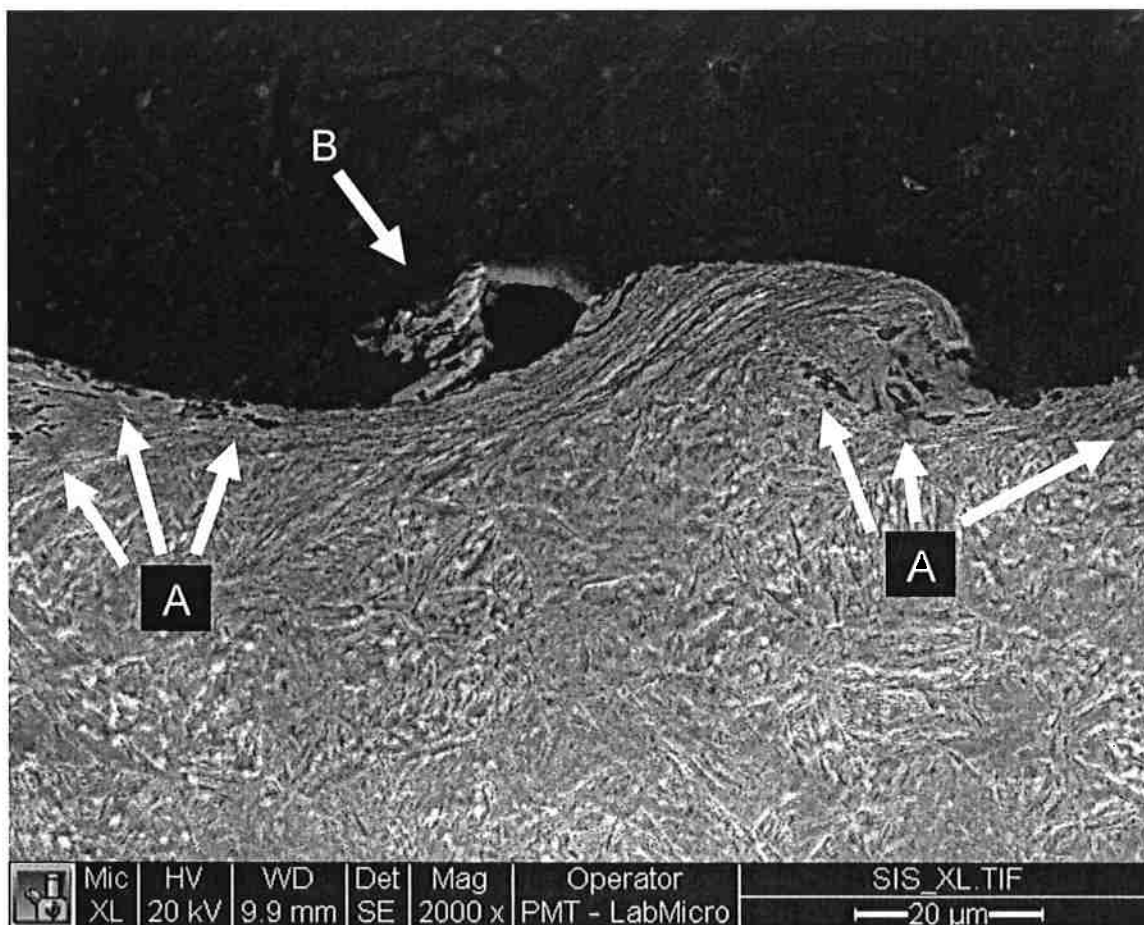


Figura 14: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 400µm. Uma região altamente deformada com desprendimento de material e trincas. As setas A indicam trincas e a seta B aponta para um pedaço quase destacado do pino. SEI-MEV.

5.2.3 Pino ensaiado com adição de Cu 20µm.

Na Figura 15 observa-se uma seção do pino com vários aumentos. Nessa sequência é possível observar a não homogeneidade das camadas que compõe a superfície do pino, isso fica claro nas imagens com menor aumento.

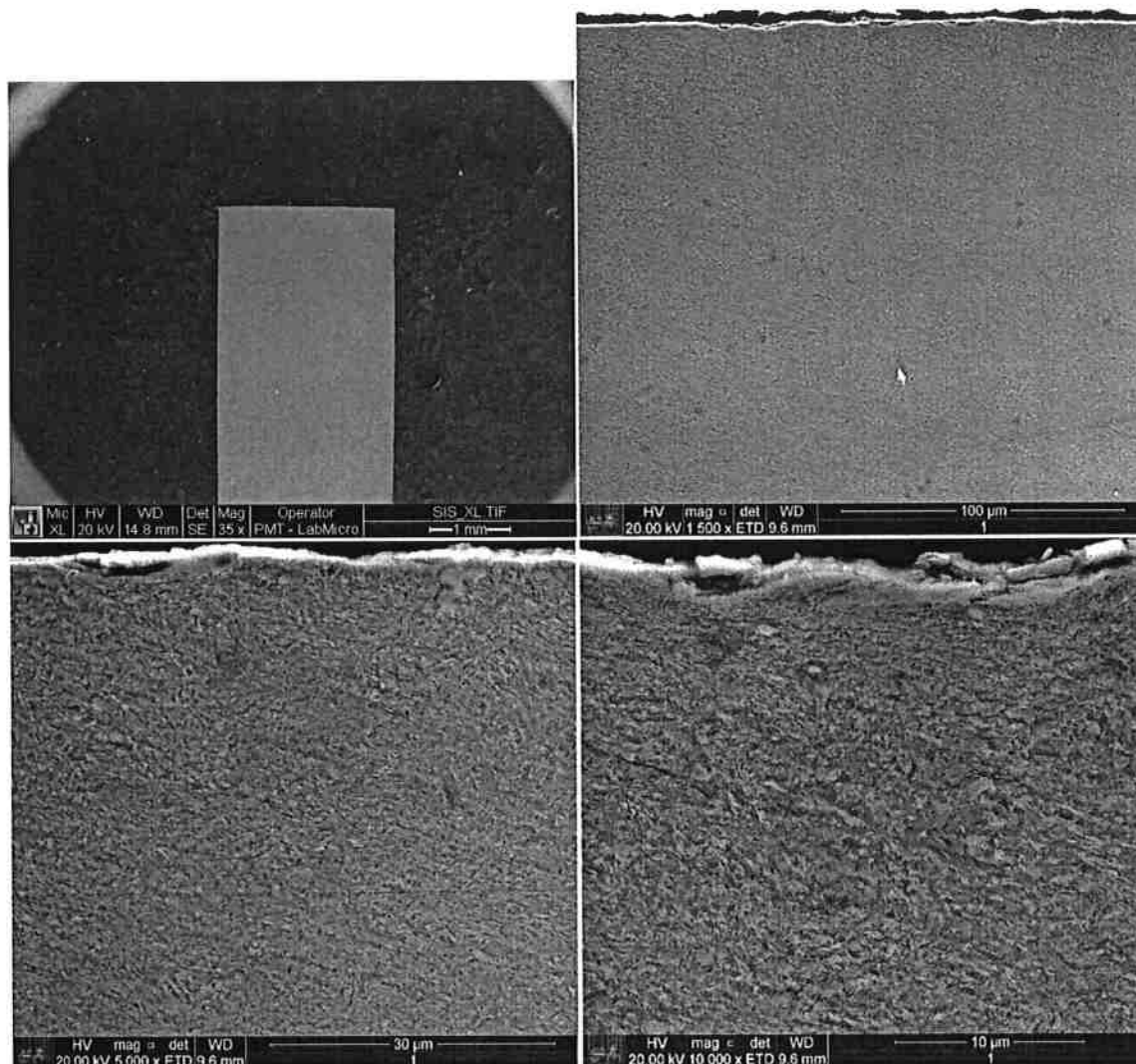


Figura 15: Imagens da seção transversal do pino ensaiado com acréscimo de Cu 20 μ m. Nas imagens com menor aumento fica clara a não homogeneidade das camadas presentes na superfície do pino. SEI-MEV.

Na imagem com 5000 e 10000 vezes de aumento (Figura 16) notam-se regiões deformadas plasticamente se destacando da superfície do pino, junto ao material adicionado no ensaio e deformado durante ele (indicados pelas setas A). Nessa figura de maior aumento observa-se também o que parecem ser trincas próximas à superfície do pino (indicadas pelas setas B), além de uma camada com microestrutura diferente do resto do pino (indicada pelas setas C) e também uma camada de óxidos na superfície contendo cobre e ferro, caracterizada pela análise EDS (Figura 17).

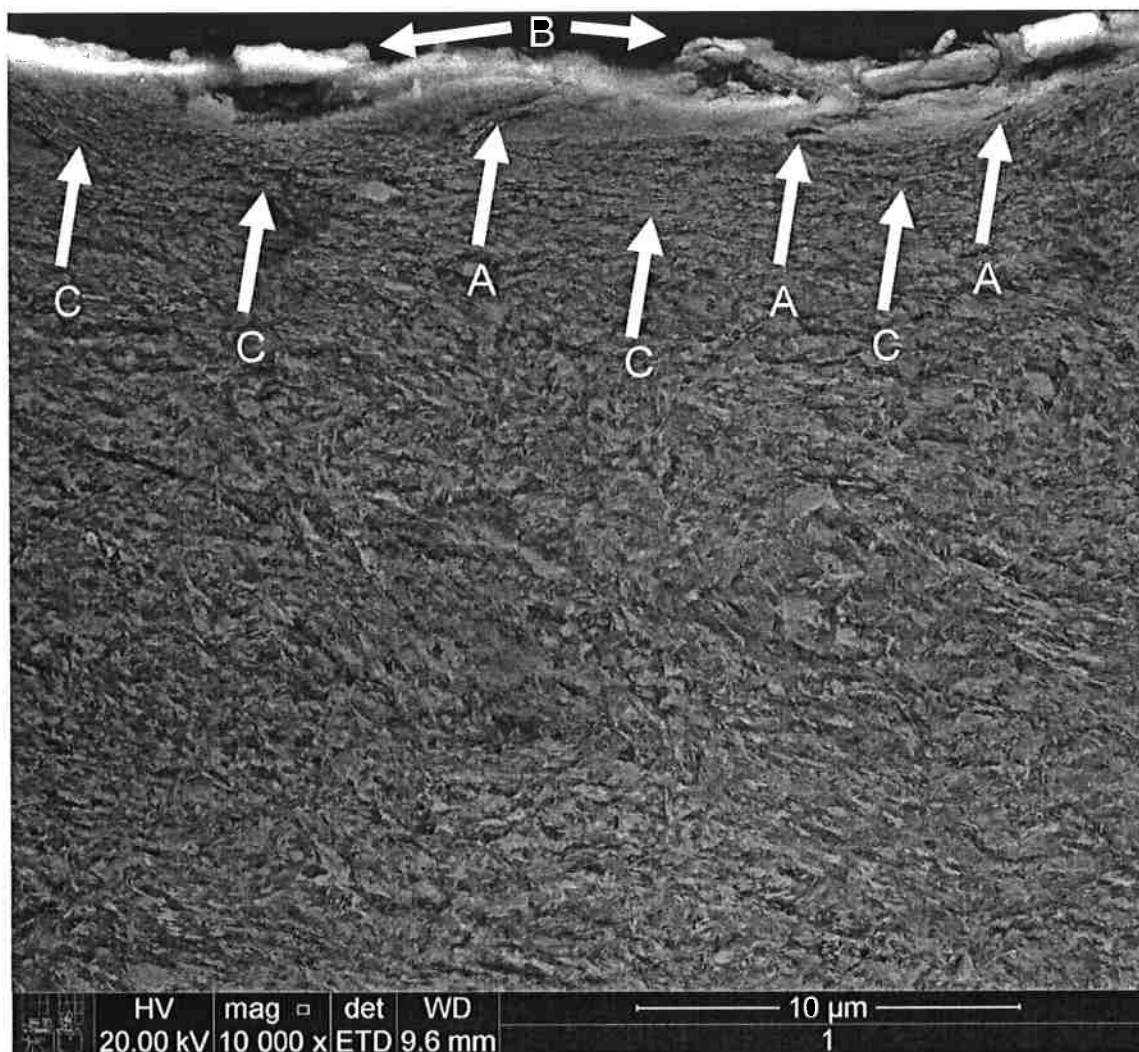


Figura 16: Detalhe da imagem da seção transversal do pino ensaiado com acréscimo de Cu 20 μ m. As setas A indicam trincas, setas B apontam para misturas de pedaços descolados da peça misturados com as partículas de cobre adicionadas ao ensaio e as setas C apontam para região deformada durante o ensaio. SEI-MEV.

Quando se comparam os resultados de microanálise EDS dos diferentes pontos escolhidos (Figura 17 e Tabela 5), nota-se uma diferença de composição química entre os pontos analisados na medida em que se sai da região mais próxima à superfície e se analisa as camadas mais internas. Nos pontos 1 e 2 existe uma quantidade elevada de oxigênio e cobre o que indica a presença de óxido de cobre nessas camadas. Nos pontos 3 e 4 também se nota a presença de cobre, mas em quantidade menor, nos demais pontos analisados não se encontrou quaisquer sinais de cobre e oxigênio. Isso mostra uma alteração química das camadas exógenas causadas pelo ensaio.

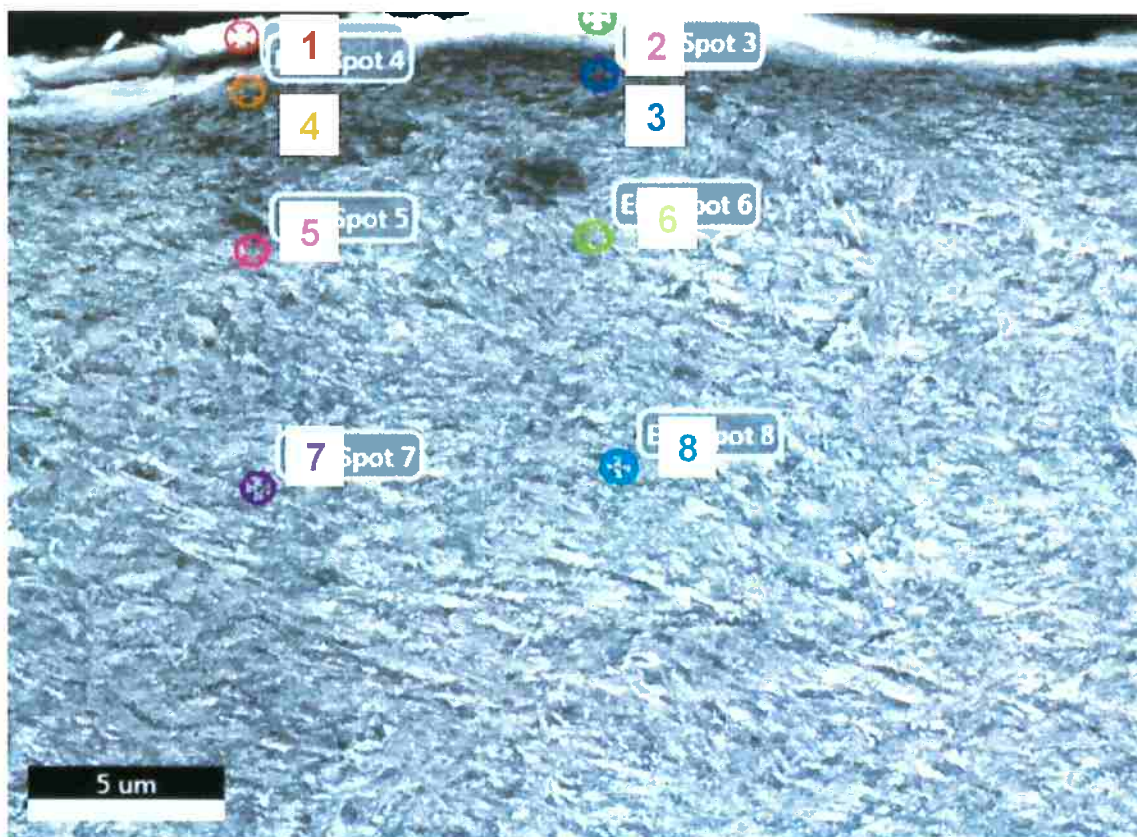


Figura 17: Locais em que foram realizadas as microanálises EDS no pino ensaiado com adição de Cu 20μm.

Tabela 5: Resultados dos EDS de ponto nos oito locais (Figura 17) em que foi realizado no pino ensaiado com adição de Cu 20μm. Resultados em porcentagem atômica

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	Ponto 7	Ponto 8
O (%At)	35.33	23.45	-	-	-	-	-	-
Al (%At)	1.67	1.00	-	-	-	-	-	-
Si (%At)	1.39	1.03	0.26	0.23	0.11	0.31	0.23	0.67
Mo (%At)	0.45	0.50	0.09	0.11	0.08	0.04	0.07	0.24
Ti (%At)	0.20	-	-	-	-	-	-	-
Cr (%At)	1.33	0.78	0.91	0.86	1.04	0.98	0.92	1.20
Mn (%At)	0.41	0.84	0.77	0.83	0.75	0.79	0.98	1.16
Fe (%At)	33.58	63.91	97.52	94.67	98.03	97.87	97.82	96.72
Cu (%At)	25.64	8.48	0.44	3.30	-	-	-	-

Na Figura 18 é destacada a camada deformada plasticamente, que tem espessura média de 3,601μm e desvio padrão de 0,723μm. Essa imagem mostra uma nítida diferença entre as microestruturas das camadas deformada plasticamente e da camada que se manteve intacta após o ensaio.



Figura 18: Imagem com 10000x de aumento da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20µm em destaque sua camada deformada. SEI-MEV.

A Figura 19 mostra apenas a imagem produzida com um aumento de 1500 vezes. Com esse aumento pode se observar a existência de diferentes regiões na superfície do pino, algumas mais desgastadas (indicadas pelas setas A) e outras menos desgastadas (indicadas pelas setas B).

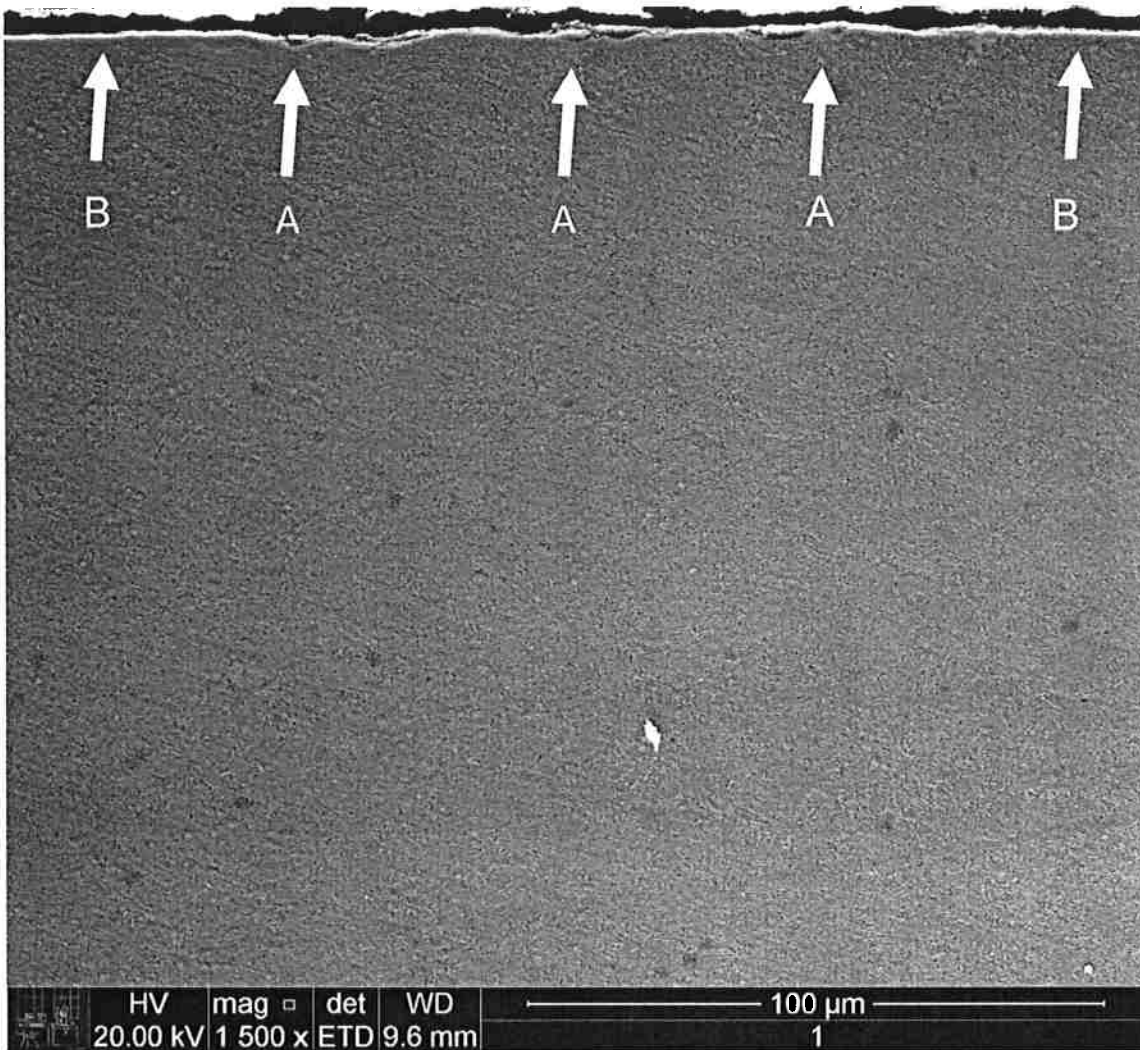


Figura 19: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20µm, as setas A indicam regiões mais desgastadas do que as apontadas pelas setas B. SEI-MEV.

Na Figura 20 mostra uma região extremamente deformada plasticamente e desgastada em que a camada superficial do material se dobra sobre ela mesma (deformação plástica antes do destacamento desta região para formação de debris).

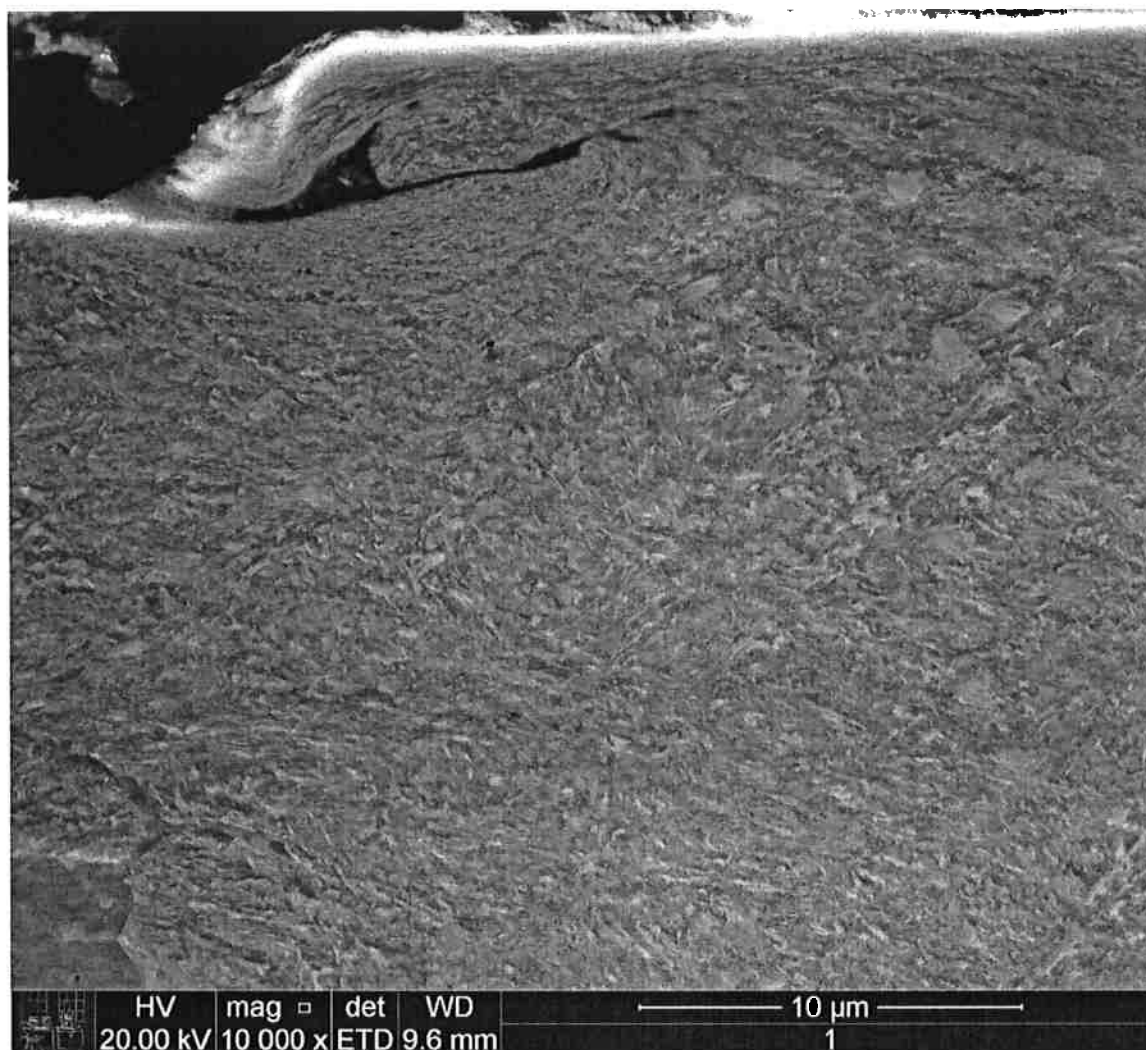


Figura 20: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de Cu 20μm. Região altamente deformada plasticamente. SEI-MEV.

5.2.4 Pino ensaiado com adição de grafite.

Na Figura 21 observa-se uma seção do pino com vários aumentos. Nessa sequência é possível observar a não homogeneidade da superfície do pino, isso fica claro nas imagens com menos aumento. É possível observar nas três imagens com maior aumento uma superfície totalmente irregular, extremamente deformada plasticamente e desgastada.

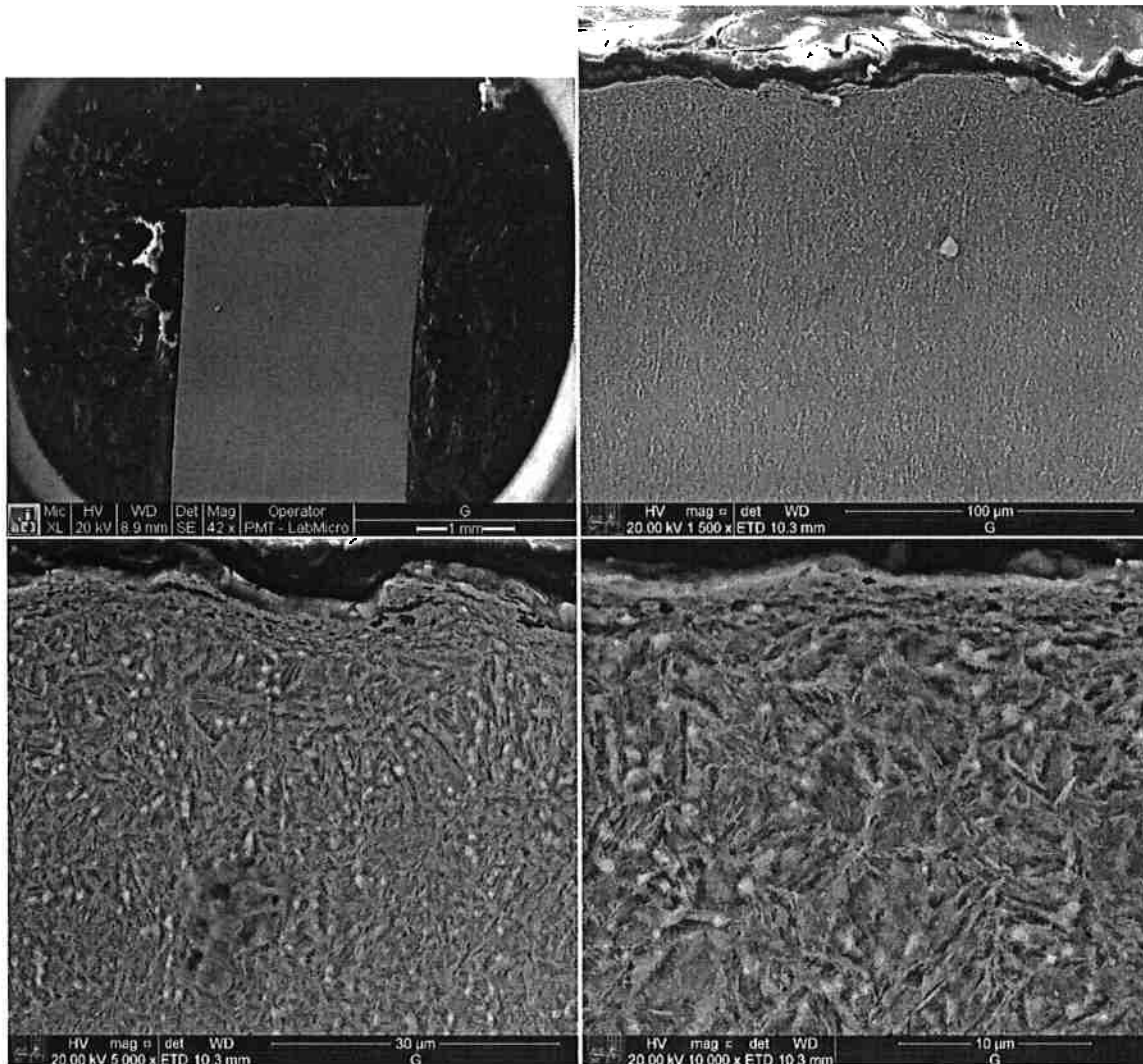


Figura 21: Sequência de imagens feitas a partir de uma seção transversal do pino ensaiado com adição de grafite particulado em que se observa uma superfície extremamente deformada plasticamente e desgastada. SEI-MEV

Na imagem produzida com um aumento de 1500 vezes observa-se que existem regiões na superfície desse pino mais e menos desgastadas. Na metade direita da imagem junto à superfície do pino observa-se região totalmente plana, diferente das outras regiões dessa imagem. Na imagem com 5000 vezes de aumento (vide Figura 21) observam-se trincas próximas à superfície e regiões em que o material se desprende do pino. Já na imagem com 10000 vezes (vide Figura 22) fica mais fácil de notar uma camada deformada plasticamente, com microestrutura diferente do resto do pino. Na Figura 22 se destaca a camada deformada plasticamente, que apresentou

uma espessura média de $1,583\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,535\mu\text{m}$ calculada através do programa ImageJ.

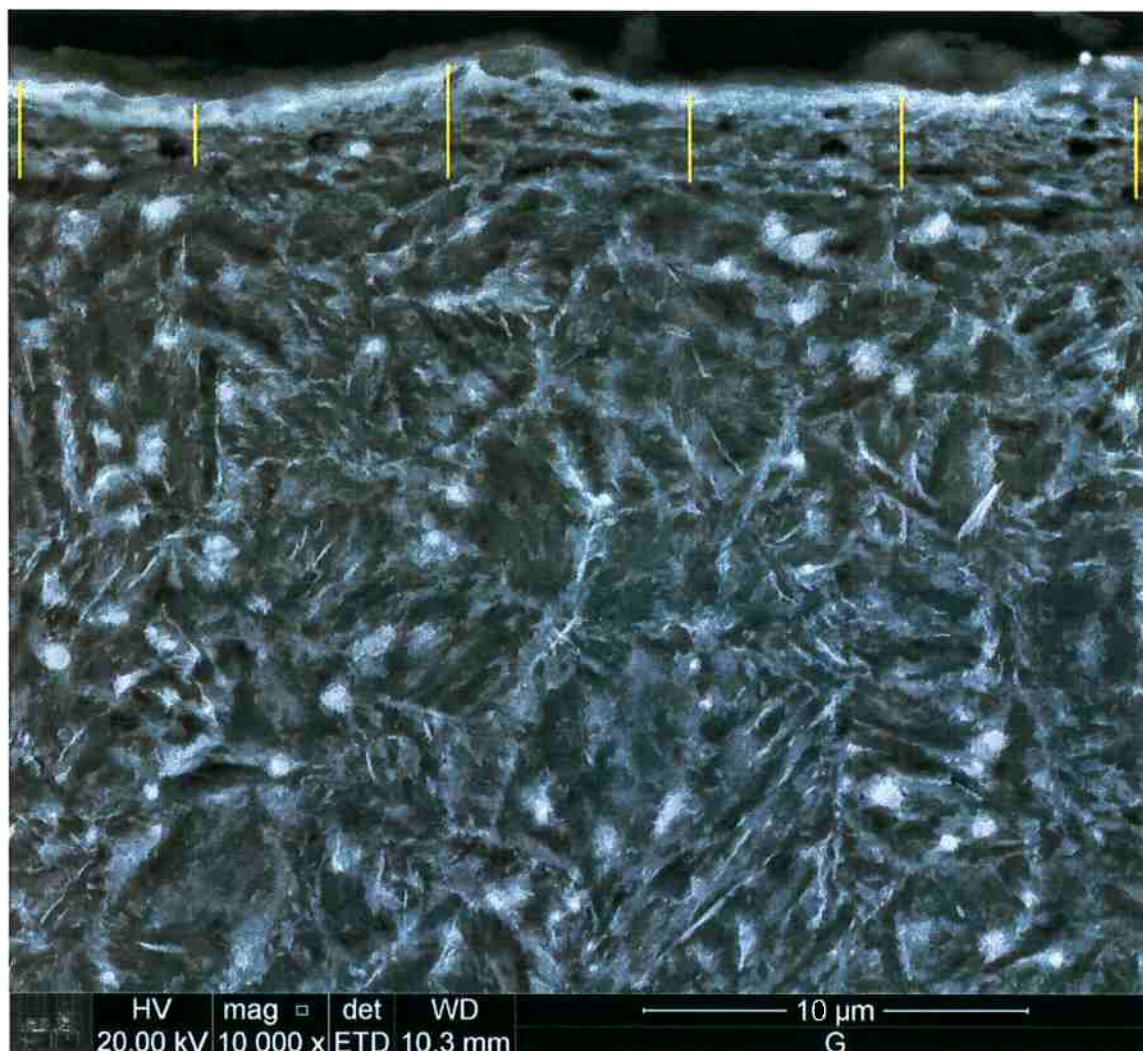


Figura 22: Imagem da seção transversal do pino ensaiado com adição de grafite particulado e destaque da camada deformada com espessura média de $2,0\mu\text{m}$. SEM-MEV.

5.2.5 Pino ensaiado sem adição de partículas.

Na Figura 23 observa-se uma seção do pino com vários aumentos. Nessa sequência é possível observar um desgaste e uma deformação plástica extremamente elevada da superfície do pino. Também se observa debris junto com material que ainda está se soltando do pino, esse material será moído mecanicamente formando debris.

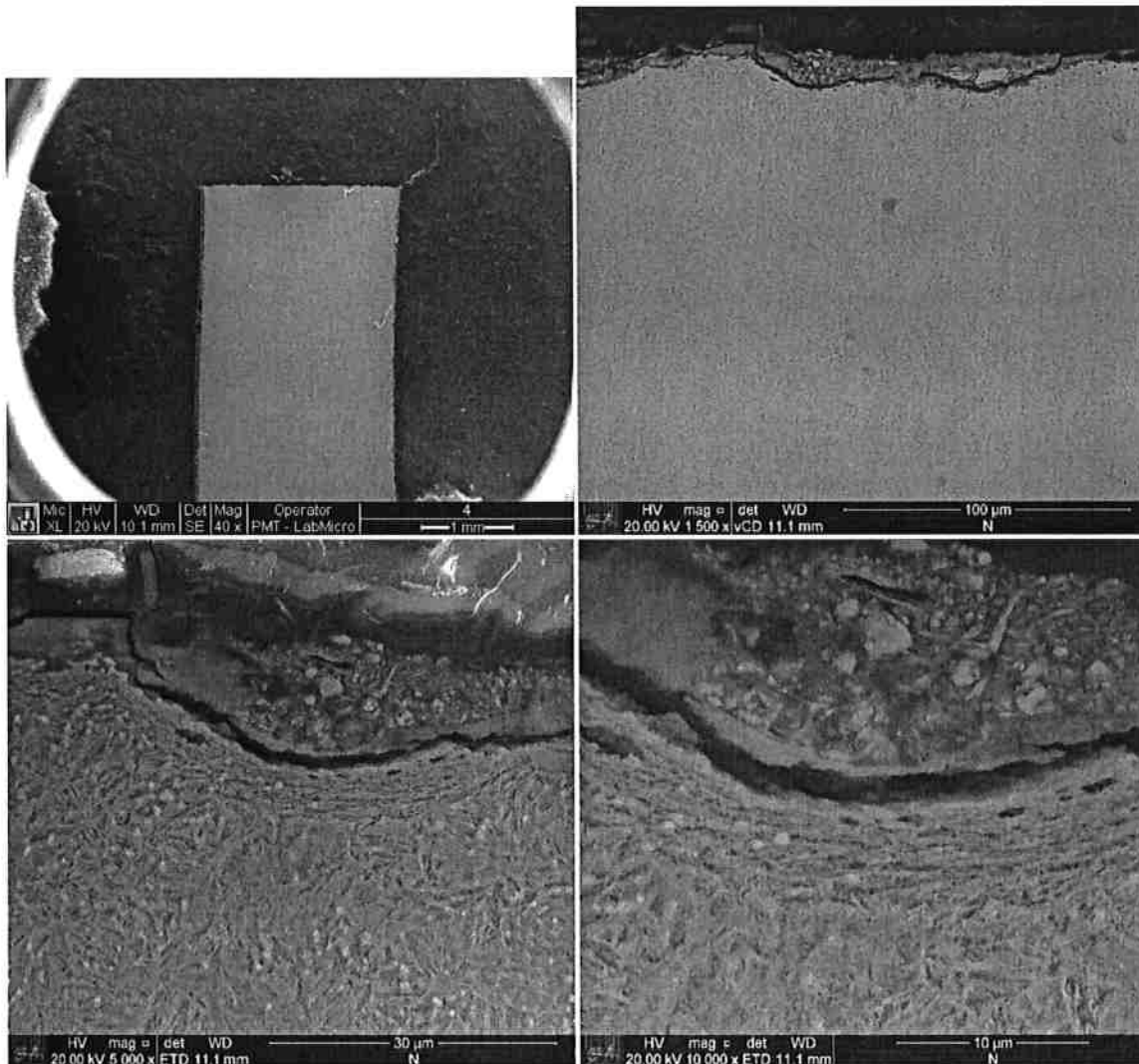


Figura 23: Imagens do pino ensaiado com adição de grafite particulado. Observa-se a alta deformação plástica da superfície junto com um elevado desgaste, partículas que se destacam do pino e debris. SEM-MEV.

Na imagem produzida com um aumento de 1500 vezes (Figura 24) observa-se a existência de algumas regiões em diferentes estágios do processo de abrasão. No centro e na parte esquerda da imagem junto à superfície do pino estão regiões muito desgastadas (indicadas pelas setas A), camadas de óxido completamente descoladas do pino (indicadas pelas setas B), pedaços do pino que estão no meio do processo de descolamento da amostra (indicadas pelas setas C), assim como trincas no pino (indicadas pelas setas D), à direita também são observadas trincas, apesar da

abrasão não ter sido tão intensa, mesmo assim já se pode observar uma camada endógena deformada.

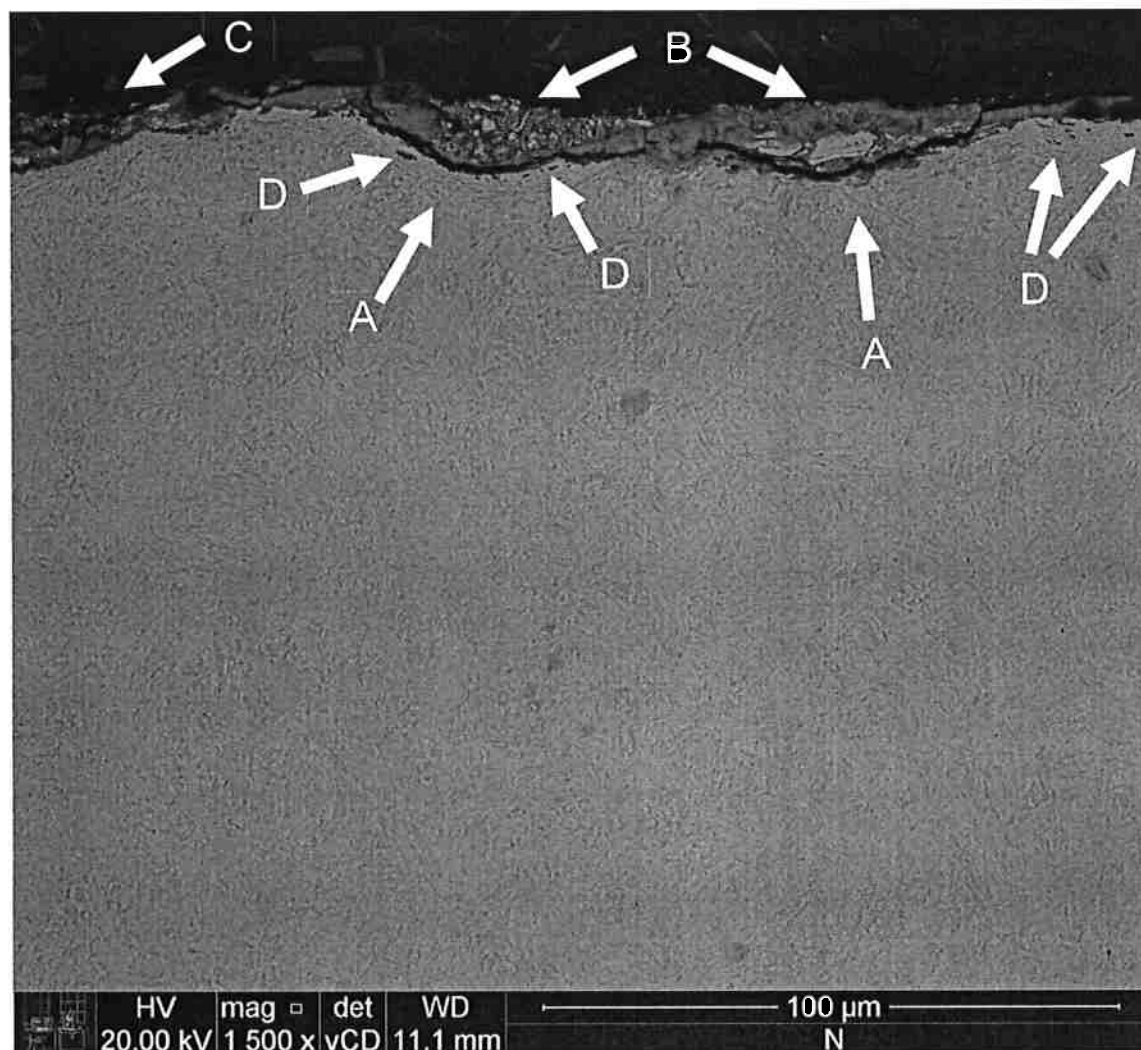


Figura 24: Imagem do pino ensaiado sem nenhuma adição. As setas A indicam regiões muito desgastadas, setas B apontam para camadas de óxido completamente descoladas do pino, as setas C apontam para região que estão no meio do processo de descolamento da amostra e as setas D apontam para trincas. SEI-MEV.

Com o auxílio da análise de EDS por área, realizado em três diferentes pontos da amostra (Figura 25), pode-se identificar uma camada de óxidos se desprendendo da superfície da amostra, como descrito acima. A Tabela 6 indica uma alteração da composição química de das áreas um e dois em relação à composição química inicial

do pino. Existe a presença de oxigênio nessas áreas, o que indicando a presença de óxidos (de ferro) assim como a sua ausência de oxigênio na área três.

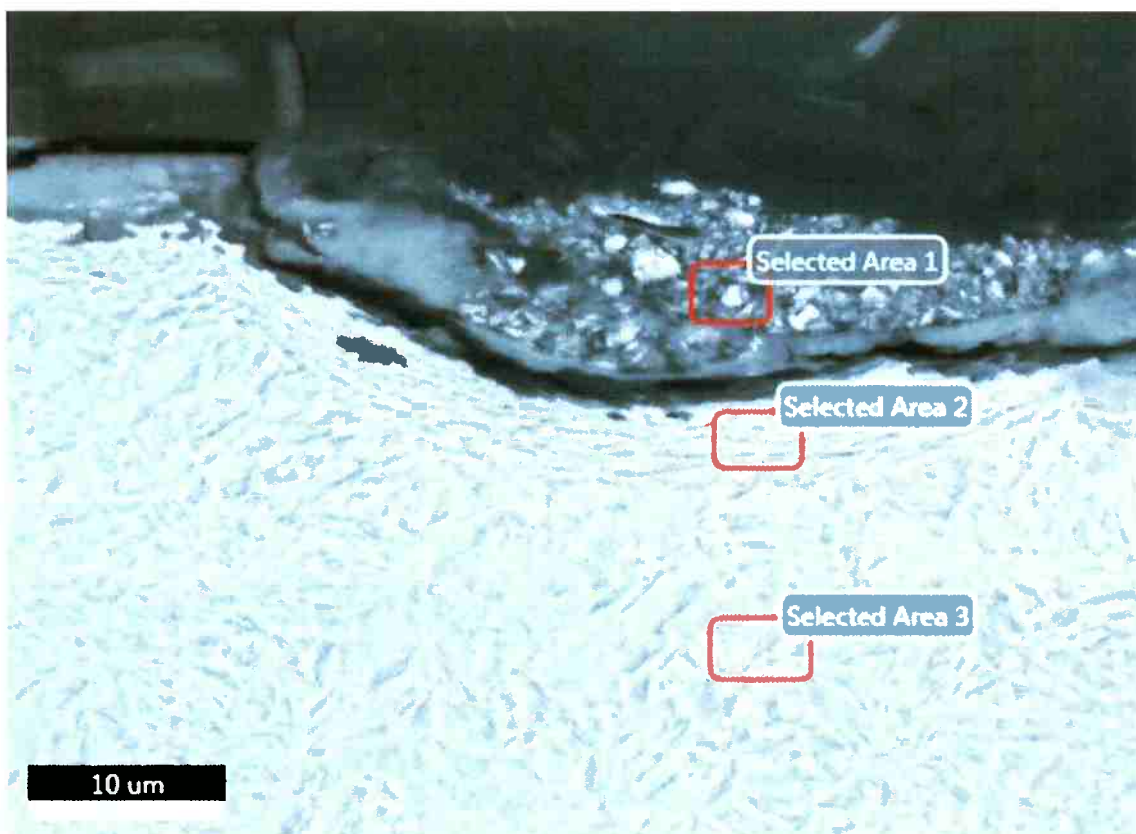


Figura 25: Imagem do pino ensaiado sem nenhuma adição. As três regiões em que foram feitas as análises EDS nessa amostra.

Tabela 6: Composição química das análises de EDS realizadas nos três diferentes pontos (Figura 25) da amostra ensaiada sem adição de meio interfacial.

	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
O (%At)	31.30	14.91	-
Si (%At)	1.56	-	0.57
Mo (%At)	0.49	0.31	0.35
Ti (%At)	0.59	-	-
Cr (%At)	3.53	0.94	1.47
Fe (%At)	62.54	82.91	94.00
Mn (%At)	-	0.93	3.60

Para se calcular o tamanho da camada deformada se utiliza uma imagem com aumento de 10000 vezes (Figura 26) e o auxílio do programa ImageJ. Assim se determinou que a camada deformada tem uma espessura média de $3,5\mu\text{m}$ e desvio padrão de $0,4\mu\text{m}$.

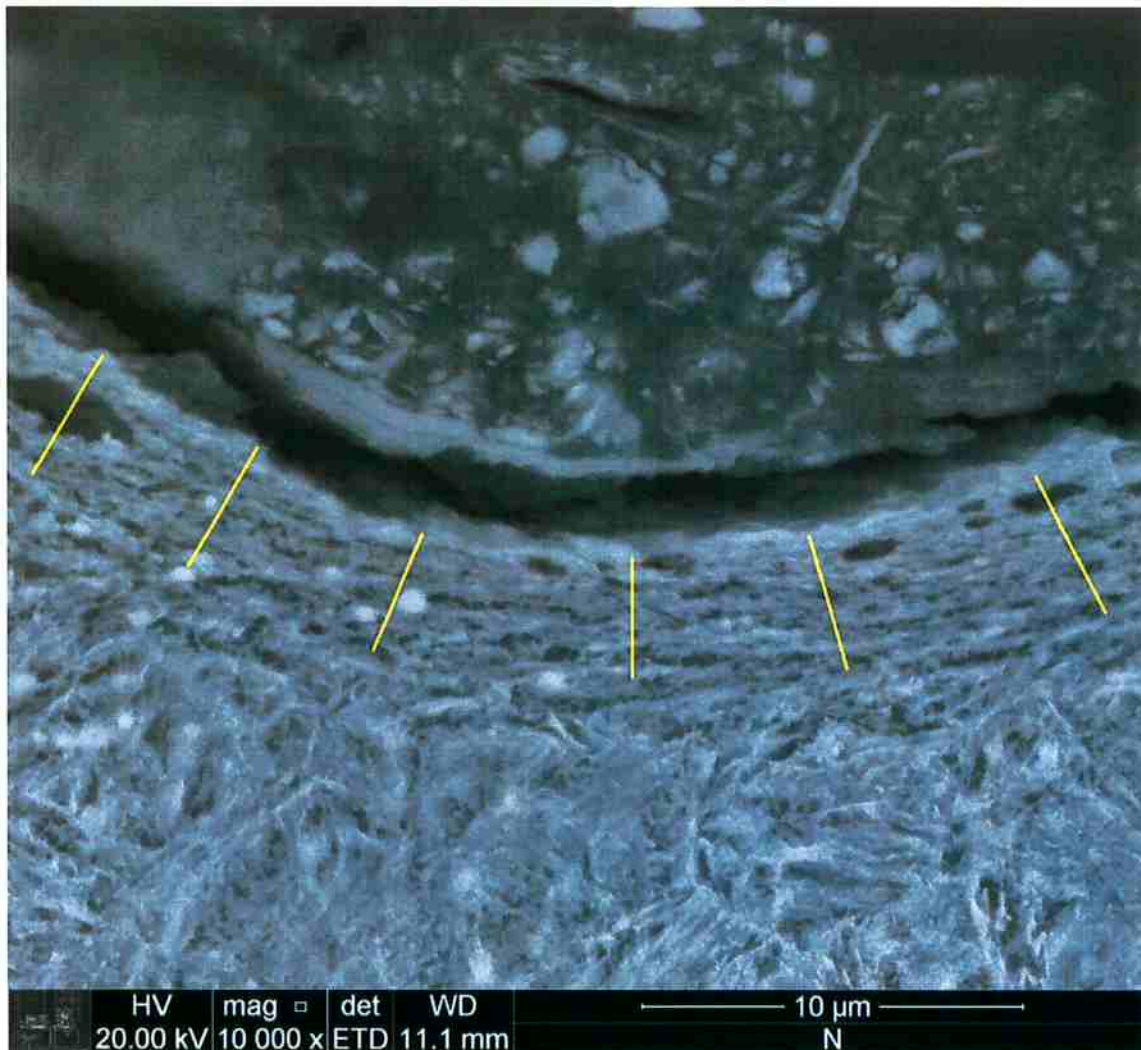


Figura 26: Imagem de uma seção transversal do pino ensaiado sem nenhuma adição. Em destaque a camada deformada com espessura média de $3,8\mu\text{m}$.

5.3 Microanálise química das diferentes camadas superficiais (endógenas e exógenas)

Foi analisada uma região deformada plasticamente do pino utilizado no ensaio com adição de Cu 20 μ m e analisou-se a composição química através do EDS por ponto em diferentes regiões com diferentes deformações plásticas da microestrutura. Foram analisados oito pontos distribuídos em dois grupos de quatro. O objetivo foi colocar os pontos de análise em locais de diferente microestrutura tentando analisar quimicamente as diferentes camadas deformadas plasticamente dessa amostra (Figura 17). Os resultados indicam que há apenas uma variação de composição química nas camadas mais superficiais. Já as camadas mais internas, independentes do grau de deformação plástica, se mantêm com a mesma composição química (Tabela 5).

5.4 Mapeamento de raios-X

Foram produzidos mapas de raios-X para analisar a composição química das superfícies dos discos e suas regiões desgastadas durante o ensaio. Foram analisadas as superfícies de três discos: disco usado no ensaio com adição de Cu 400 μ m, com adição de grafite e o disco usado no teste sem adição de meio interfacial.

5.4.1 Disco ensaiado com adição de Cu 400 μ m.

A Figura 27 mostra a região em que foi feita o mapa de raios-X do pino ensaiado com adição de Cu 400 μ m. Observa-se uma região mais desgastada pelo atrito com o pino e outra região à esquerda (indicada pelas setas A) menos desgastada. Na Figura 28 se observa a ausência de oxigênio nessa região menos desgastada (indicada pelas setas A na Figura 27) e uma maior presença desse elemento químico nas regiões mais escuras no centro da imagem (indicada pelas setas B na Figura 27). Não é possível observar depósitos de cobre nos mapas de raios -X porque as partículas de

cobre utilizadas (Cu 400 μ m) são muito grandes quando comparadas com a resolução da imagem.

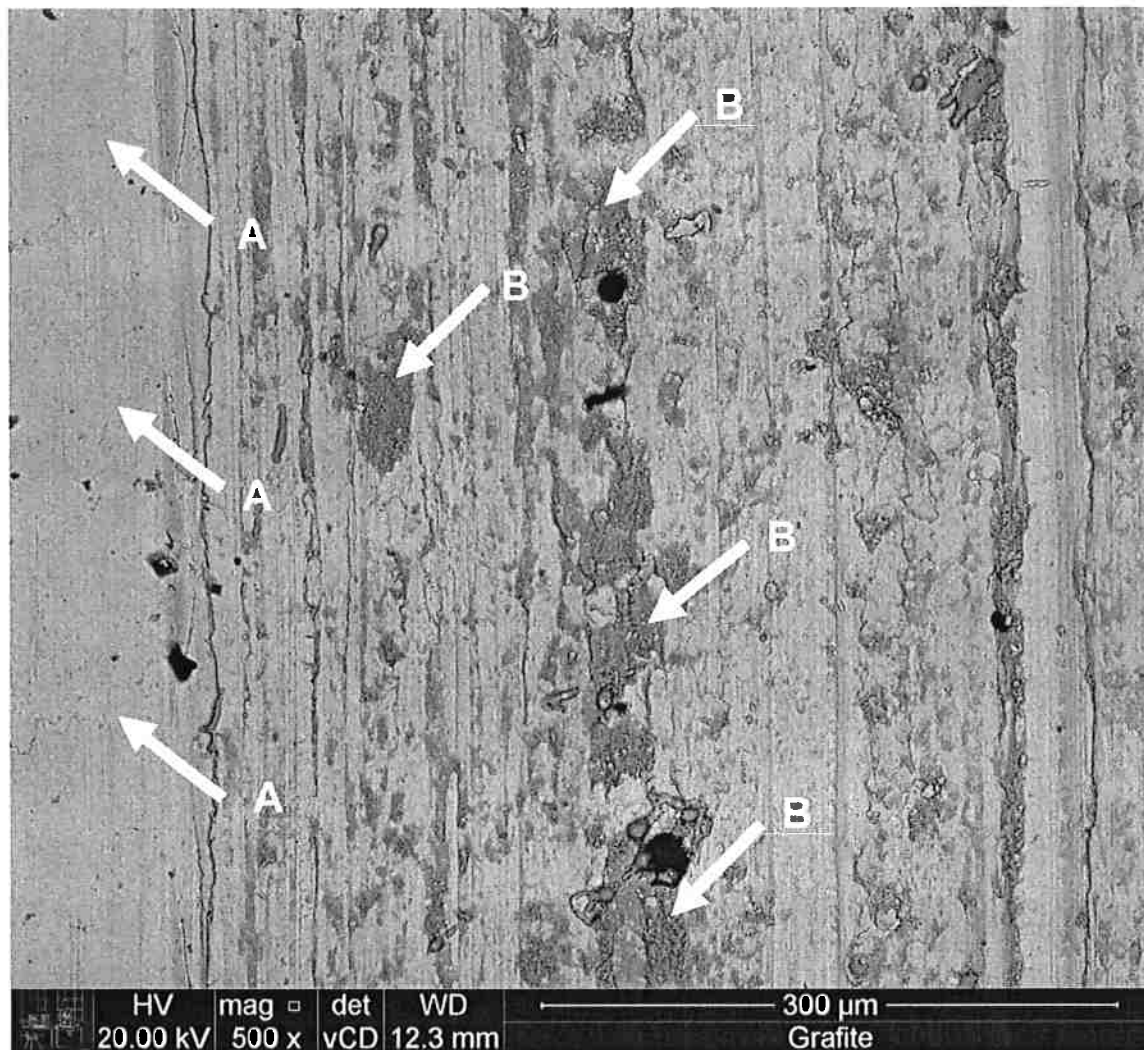


Figura 27: Região do disco ensaiado com adição de Cu 400 μ m em que foi realizado mapeamento de raios-x com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor presença de oxigênio e menor desgaste (indicada pelas setas A) e regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B).

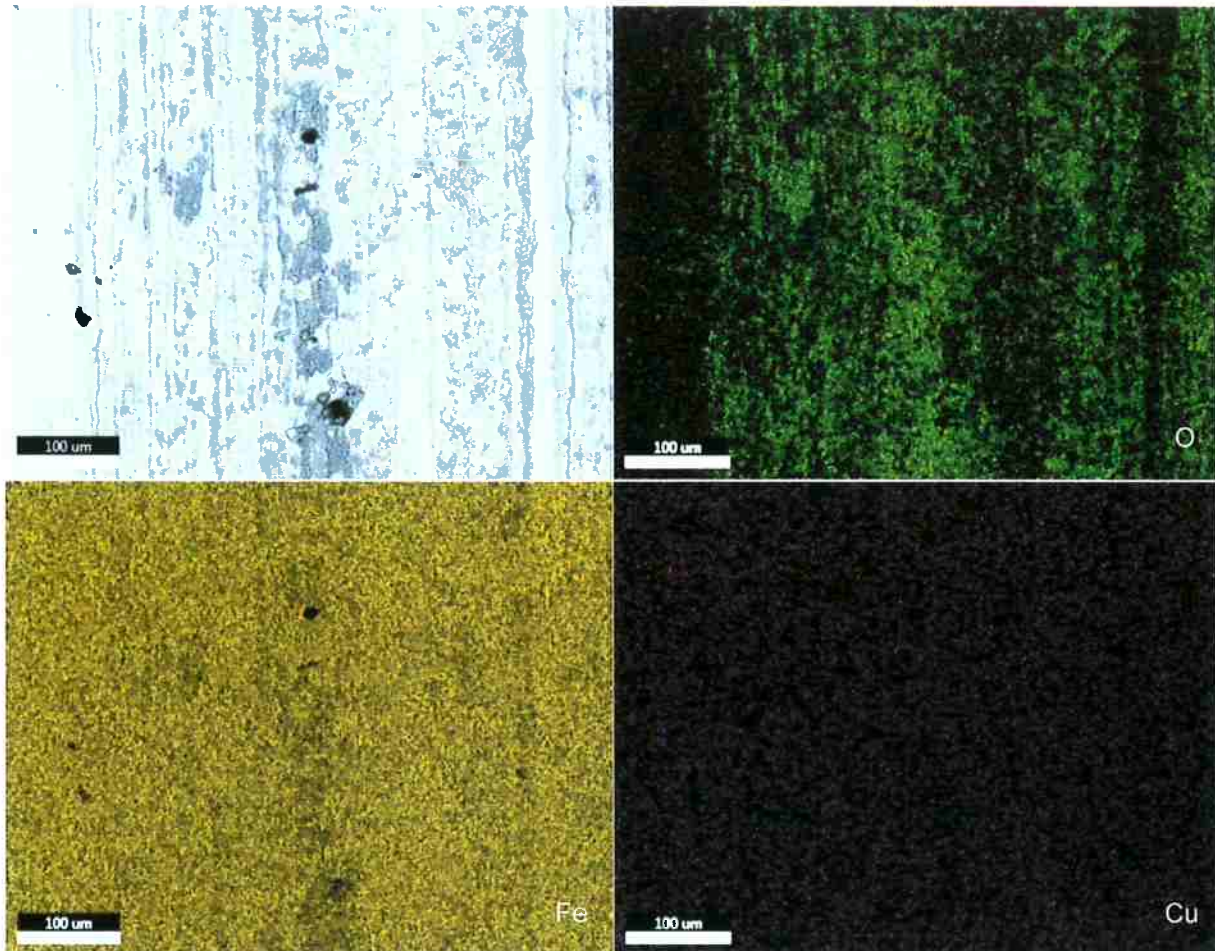


Figura 28: Mapas de raios-x do oxigênio, ferro e carbono. Produzidas a partir da Figura 27.

5.4.2 Disco ensaiado com adição de grafite

A Figura 29 mostra a região em que foi feita o mapa de raios-x do pino ensaiado com adição de grafite. Observam-se riscos e sulcos na superfície do pino e no lado esquerdo da amostra existe uma região menos desgastada. Na Figura 30 se observa uma menor quantidade de oxigênio no lado esquerdo da imagem (região menos deformada, indicada pela seta A na Figura 29) e uma maior presença desse elemento químico nas regiões mais escuras no centro da imagem (indicadas pelas setas B na Figura 29). As manchas pretas (indicadas pelas setas C na Figura 29) não indicam a presença de oxigênio nem de ferro na Figura 30, muito provavelmente são locais em que há depósito do grafite adicionado como meio interfacial.

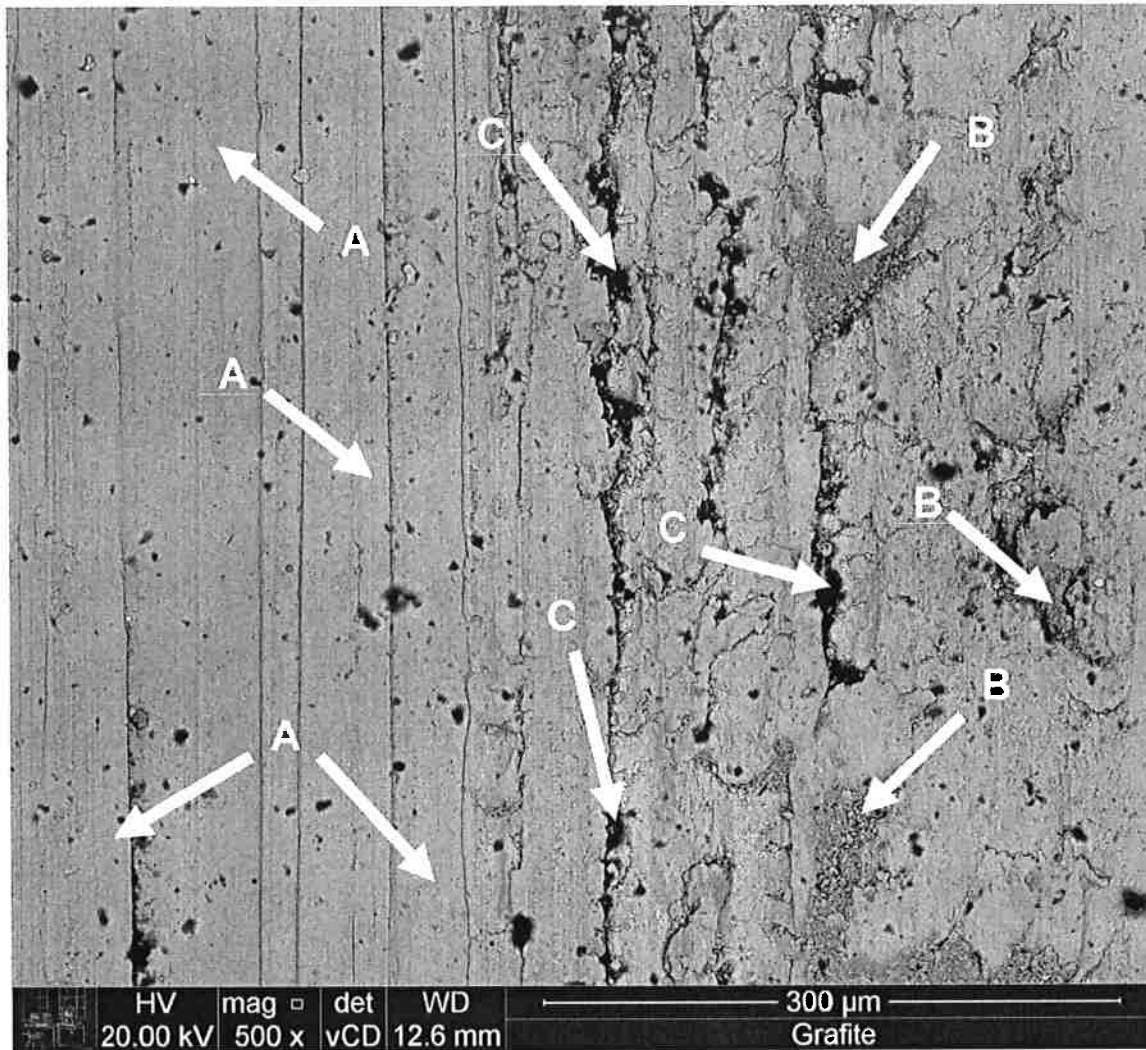


Figura 29: Região do disco ensaiado com adição de grafite em que foi realizado mapeamento de raios-x com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor deformação plástica (indicada pelas setas A), regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B) e regiões em que provavelmente está depositado o grafite adicionado (indicadas pelas setas C).

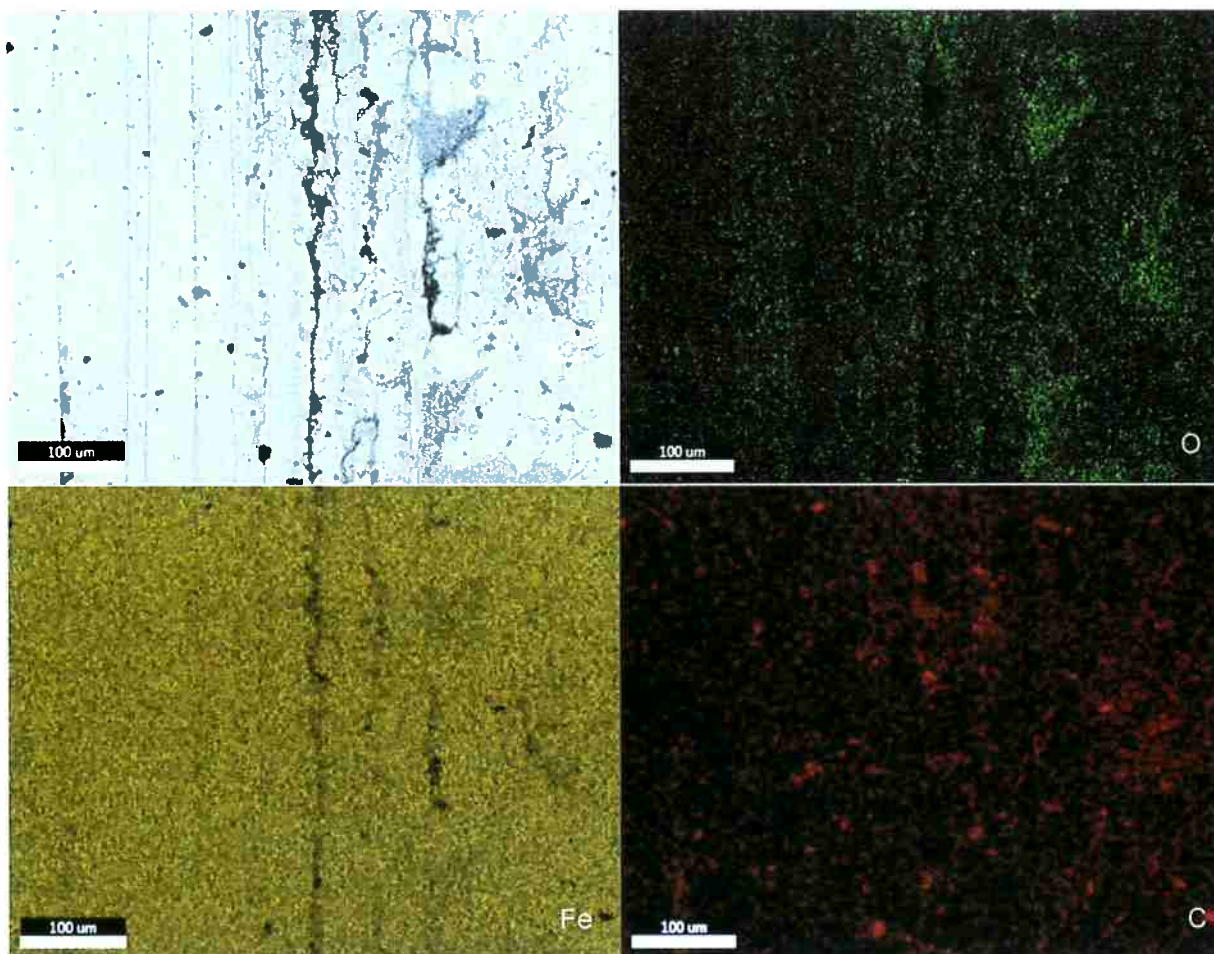


Figura 30: Mapas de raios-x do oxigênio, ferro e carbono. Produzidos a partir da Figura 29.

5.4.3 Disco ensaiado sem adição de meio interfacial

A Figura 31 mostra a região em que foi feita o mapa de raios-x do pino ensaiado sem adição de meio interfacial. Observam-se riscos e sulcos na superfície do pino e no lado esquerdo da figura existe uma região menos desgastada (indicada pelas setas A). Na Figura 32 se observa uma menor quantidade de oxigênio no lado esquerdo da imagem (região menos desgastada, indicada pela seta A na Figura 31) e uma maior presença desse elemento químico nas regiões mais escuras no centro da imagem (indicadas pelas setas B na Figura 31), assim como uma menor quantidade de ferro.

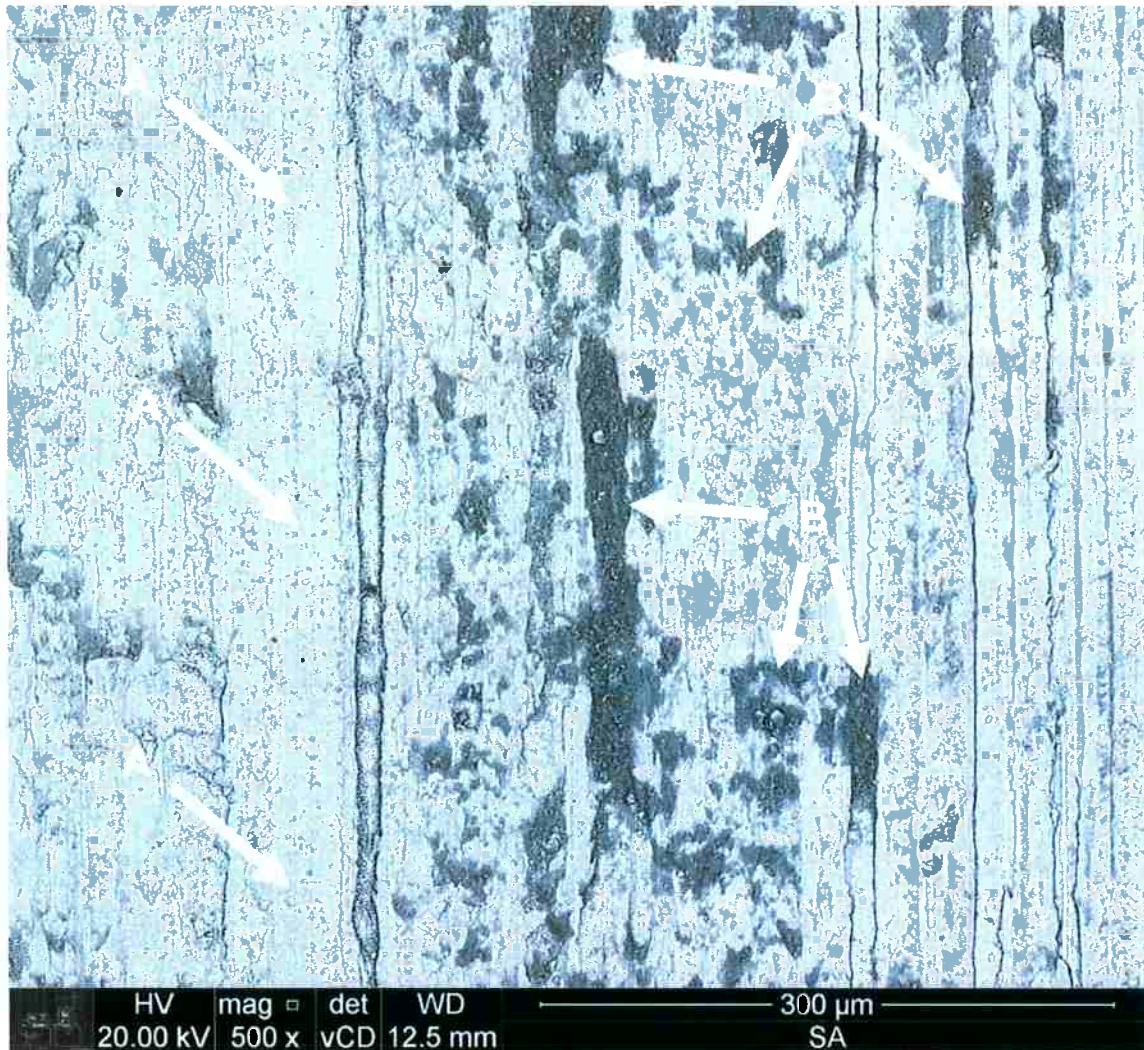


Figura 31: Região do disco ensaiado sem adição de meio interfacial em que foi realizado mapeamento de raios-X com 500 vezes de aumento. Do lado esquerdo se destaca uma região com menor deformação plástica (indicada pelas setas A) e regiões com maior presença de oxigênio (indicadas pelas setas B).

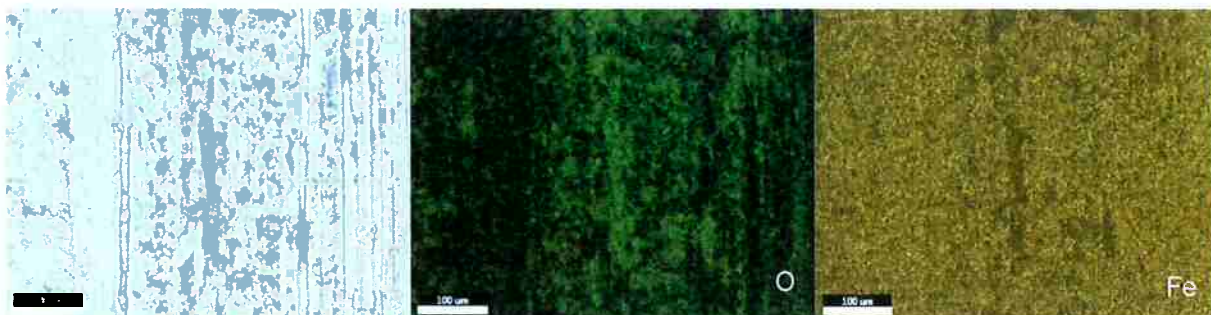


Figura 32: Mapas de raios-X do oxigênio e ferro. Produzidas a partir da Figura 31.

6 Discussão

A partir dos dados obtidos através dos ensaios, das imagens e análises realizadas pelo MEV, é interessante se destacar certos resultados. Destaca-se primeiramente uma oscilação do tamanho da camada endógena (deformadas plasticamente) em um mesmo pino, dificultando sua medição. Analisando a Figura 7, observa-se primeiro que o grafite teve o menor coeficiente de atrito de todas as amostras ensaiadas. E que todos os ensaios com adição de cobre, mesmo em granulometrias diferentes, tiveram um coeficiente de atrito maior do que o ensaio em que não se adicionou nenhum meio interfacial. Quanto ao tamanho da camada deformada, a Figura 33 e a

Tabela 7 relacionam esse tamanho médio a cada ensaio e seu respectivo aditivo.

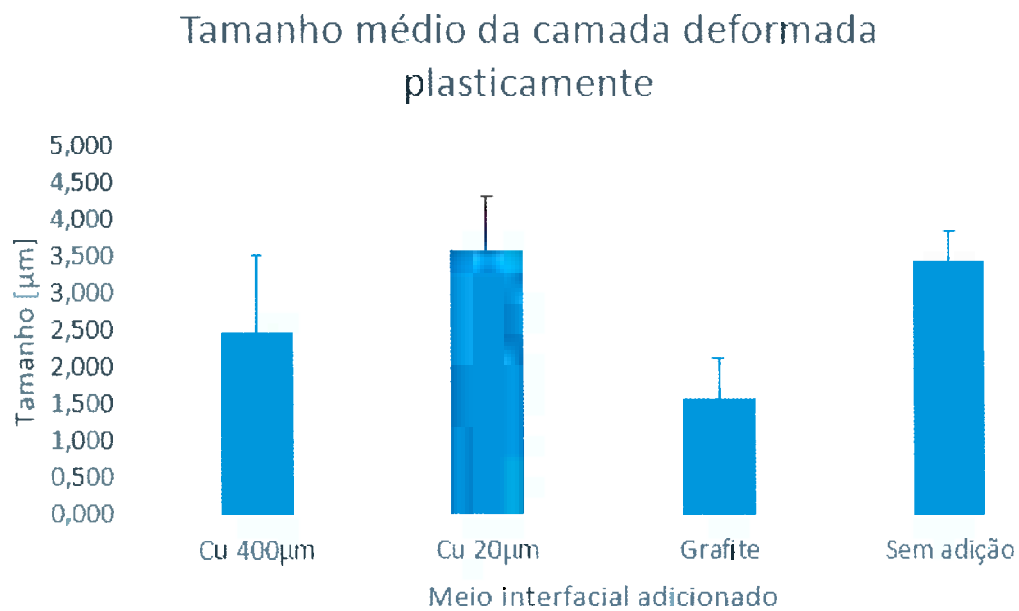


Figura 33 - Tamanho médio da camada deformada plasticamente de cada pino ensaiado.

Tabela 7: Tamanho médio da camada deformada para cada tipo de meio interfacial adicionado durante o ensaio pino contra disco.

Meio interfacial adicionado ao ensaio	Tamanho médio da camada deformada	Desvio Padrão
Cu 400 μ m	2,490	1,042
Cu 20 μ m	3,601	0,723
Grafite	1,583	0,535
Sem meio	3,556	0,338

O grafite apresenta o menor tamanho de camada deformada, já o cobre com menor granulometria apresenta uma camada deformada consideravelmente maior que o cobre com maior granulometria. É interessante observar que levando em conta o desvio padrão das medidas das camadas deformadas plasticamente dos pinos ensaiado com cobre de maior granulometria e do ensaio sem adição de meio interfacial as camadas deformadas plasticamente podem ter espessuras parecidas.

As análises de EDS não mostraram diferença de composição química entre as camadas deformadas plasticamente com diferentes microestruturas. Também com o auxílio do MEV se observou o processo de formação de debris em que o material do pino se deforma plasticamente, é arrancado e misturado mecanicamente se tornando parte do material interfacial. Algo observado após os ensaios são pinos com apenas parte da superfície desgastada pelo ensaio. Isso fica nítido na Figura 34.

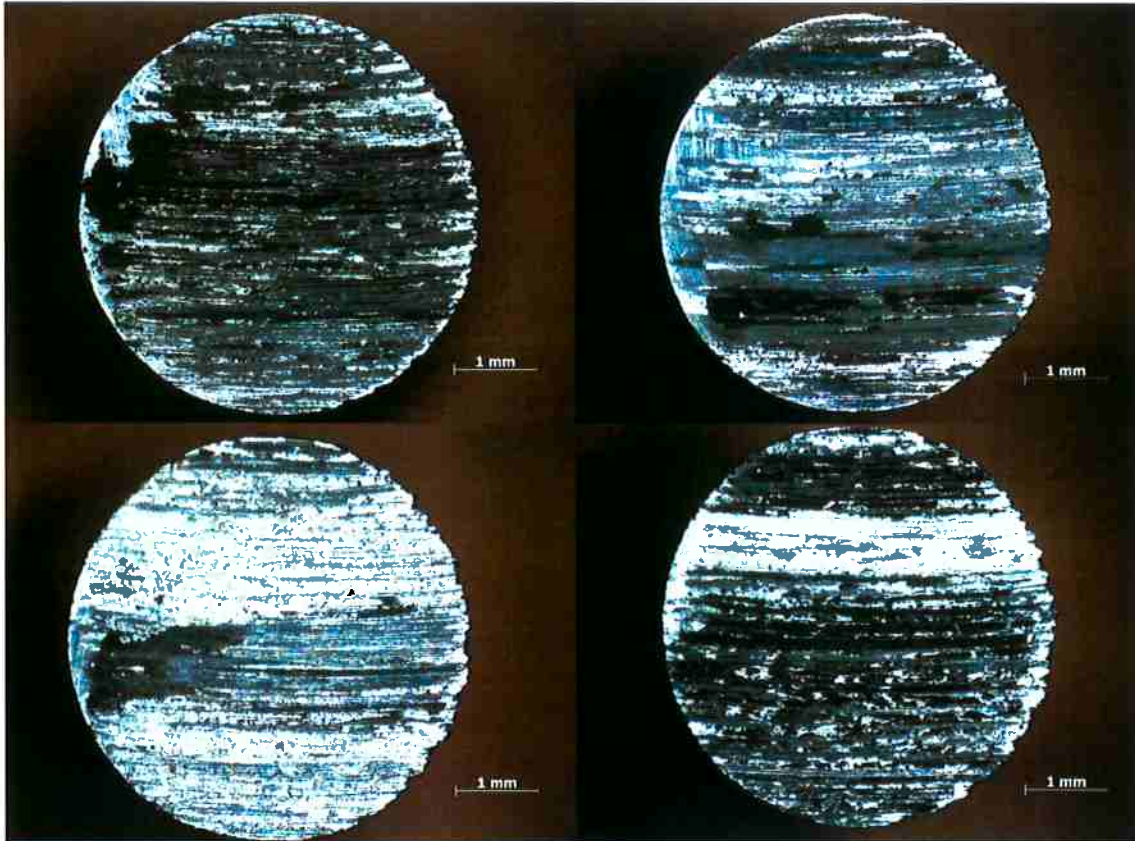


Figura 34: Pinos com diferentes graus de desgaste após serem ensaiados no tribômetro utilizado para realização dos experimentos analisados nesse trabalho. As regiões claras são regiões em que não houve desgaste durante o ensaio, as marcas observadas são do lixamento prévio. Consegue-se observar que as marcas escuras foram causadas por partículas muito menores que as partículas que causaram as marcas claras.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Observando a curva do coeficiente de atrito do ensaio que utilizou grafite como meio interfacial, seria interessante realizar ensaios com tempo de duração mais longo. O intuito seria estabilizar todos os coeficientes de atrito. Outra variação interessante seria utilizar um mesmo material com diversas granulometrias diferentes.

7 Conclusões

- Através dos resultados obtidos conclui-se que a diminuição do tamanho das partículas de cobre adicionadas no ensaio como meio interfacial aumenta o coeficiente de atrito durante o ensaio pino contra disco.
- O ensaio com adição de cobre com menor granulometria teve o maior coeficiente de atrito e também teve o maior tamanho de camada deformada plasticamente.
- Os coeficientes de atrito dos ensaios com adição de cobre com maior granulometria e sem adição de meio interfacial tiveram coeficientes de atrito muito parecidos. Os tamanhos da camada deformada plasticamente dos pinos utilizados nesses ensaios podem ser considerados próximos se for considerado o desvio padrão das medidas.
- Por fim, o ensaio com adição de grafite teve menor coeficiente de atrito e menor tamanho de camada deformada plasticamente.

8 Bibliografia

Bayer, R.G. 1994. *Mechanical wear prediction and prevention*. 1994.

Bhushan, Bharat e Gupta, B.K. 1997. *Handbook of Tribology. Material, Coatings and Surface Treatments*. Malabar, Florida : Krieger Publishing Company, 1997.

Bhushan, Bharat. 2013. *Principles and Applications of Tribology*. s.l. : John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

Cimm, Grupo. Teste de dureza Vickers. *Site da Cimm*. [Online] Grupo CIMM. [Citado em: 27 de Outubro de 2014.] http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6559-teste-de-dureza-vickers#.VFE2A_nF_k0.

Holmberg, K. 1984. Friction in low speed lubricated rolling and sliding contacts. *Espoo, Technical Research Centre of Finland, Publications 16*. 1984.

Holmberg, K. 1991. *Tribological bases for accelerated testing*. [ed.] Elsevier. London : s.n., 1991. pp. 30-31.

Holmberg, Kenneth e Matthews, Allan. 2009. *Coatings Tribology, Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*. s.l. : ELSEVIER, 2009.

Instron. Vickers Test. *Site da Instron*. [Online] Illinoy Tool Works Inc. [Citado em: 27 de Outubro de 2014.] http://www.instron.co.uk/wa/applications/test_types/hardness/vickers.aspx.

Kato, H. 2003. Severe–mild wear transition by supply of oxide particles on sliding surface. 2003, pp. 426–429.

Kennedy, D.M. e Hashmi, M.S.J. 1998. Methods of wear testing for advanced surface coatings and bulk. *Journal of Materials Processing Technology*. 1998, pp. 246-253.

Kim, G.S., Sue, N.P. 1991. *On microscopic mechanisms of friction and wear*. 1991. pp. 199-208. Vol. 149.

Palucka, Tim. 2002. The Dibner institute for the History of Science and Tecnology. [Online] 10 de 12 de 2002.

http://authors.library.caltech.edu/5456/1/hrst.mit.edu/hrs/materials/public/ElectronMicroscope/EM_HistOverview.htm.

Rahnejat, Homer. 2010. *Tribology and dynamics of engine and powertrain. Fundamentals, applications and future trends*. s.l. : Woodhead Publishing Limited, 2010.

Rigney, D. A., Chen, L. H., Naylor, M. G. S., Rosenfield, A. R. 1984. *Wear process in sliding system*. 1984.

W. Haertel Jr., P.S. Zanotto, A. Sinatora. 2013. Influence of mild and severe wear condition in the formation and stability of friction film in clutch system. *Wear of Materials 2013*. Abril-Maio de 2013, pp. 1384–1391.

Wang, Q. Jane e Chung, Yip-Wah. 2013. *Encyclopedia of Tribology*. s.l. : Springer Reference, 2013.