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

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO COBRE E DO LATÃO

por

William Felipe Streck

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

Porto Alegre, julho de 2017.

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**
**Escola de Engenharia**
**Departamento de Engenharia Mecânica**

# ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO COBRE E DO LATÃO

por

William Felipe Streck

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

Prof. Thamy Christina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Patric Daniel Neis

Comissão de Avaliação:

Prof. Cíntia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Ney Francisco Ferreira

Prof. Tiago Becker

Porto Alegre, 7 de julho de 2017.

DEDICATÓRIA

Eu dedico este trabalho, e tudo que até então construí profissionalmente, aos meus pais Cléria e Marcos, por tudo que construíram com muito sacrifício ao longo de suas vidas, tornando possível que eu me dedicasse de forma integral aos meus estudos, sem deixar que me faltasse nada.

Dedico o trabalho também ao meu amor, Priscila, por ser a pessoa mais incrível que já existiu, que carinhosamente me coloca para cima, me fazendo sentir invencível, capaz de superar qualquer dificuldade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Patric, que tornou possível a realização deste trabalho, e também pela sabedoria e excelência que demonstrou como orientador, me ajudando e tendo paciência ao longo deste período.

Meus agradecimentos também à equipe do LATRIB, mais especificamente à Adriele, pelo processamento dos dados, realização das interferometrias, e orientações quanto a escrita, e ao Caliel, pela ajuda na realização dos ensaios, e pela orientação quanto ao uso do tribômetro.

STRECK, W. F., "**Análise do comportamento tribológico do cobre e do latão**". 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.


**RESUMO**

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento tribológico de amostras de cobre ensaiadas contra discos de aço SAE 1020, e também fazer uma comparação do comportamento do cobre e do latão quando atritados contra um disco de ferro fundido cinzento. Para que fosse possível realizar as análises, foi empregada uma metodologia que variava a pressão de contato (2,55 MPa, 1,91 MPa, e 1,27 MPa) e a velocidade de deslizamento (0,395 m/s, 0,317 m/s, e 0,235 m/s) dos ensaios, enquanto que a distância de deslizamento permaneceu fixa em 395 m. Foram quantificados resultados de coeficiente de atrito (COF), desgaste dos pinos e dos discos, e resíduo resultante dos testes. Para os ensaios de cobre contra disco de aço, foi possível perceber uma elevada sensibilidade destes resultados com a pressão de contato exercida, enquanto foi observada uma baixa sensibilidade dos mesmos com relação à velocidade de deslizamento. Com o auxílio da literatura, foi possível perceber que existe um limiar de pressão de contato mínima para a ocorrência de elevadas deformações plásticas, que levaram a formação de cascas nos pinos de cobre. Ao comparar o comportamento do cobre e do latão quando ensaiados contra disco de ferro fundido cinzento, foi possível notar a influência que a presença de zinco no pino de latão teve nos resultados de desgaste e COF. Os ensaios envolvendo latão apresentaram desgaste bem menos severo do que os ensaios envolvendo cobre, sendo possível notar a presença de sulcos no disco ensaiado contra cobre (arrancamento de material), enquanto a superfície atritada contra latão não apresentou tais sulcos. Os resultados obtidos puderam ser justificados com conclusões de estudos anteriores, que propunham que o mecanismo de desgaste muda conforme a presença de zinco se altera na composição química do cobre.



**PALAVRAS-CHAVE:** Cobre, latão, desgaste.

STRECK, W. F., "**Analysis of the tribological behavior of copper and brass**". 2017. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.


## ABSTRACT

The present study aims to analyze the tribological behavior of copper rubbed against SAE 1020 steel discs, and perform a comparison of friction and wear of copper and brass when rubbed against a gray cast iron disc. To make the analysis possible, it was employed a methodology that varied the contact pressure (2,55 MPa, 1,91 MPa, and 1,27 MPa) and the sliding velocity (0,395 m/s, 0,317 m/s, and 0,235 m/s) of the tests, while a fixed sliding distance of 395 m was employed. It was quantified results of coefficient of friction (COF), wear of the pins and discs, and debris released during the tests. For the tests performed with copper against steel disc, it was possible to notice a high sensibility of those results with the contact pressure, while it was observed a low sensibility with the sliding speed. With the assistance of the literature, it was possible to notice a threshold of minimum contact pressure for the occurrence of high plastic deformation on the pins selected in this study, which led to the formation of "peels" in the copper pins. When comparing the behavior of copper and brass when tested against gray cast iron disc, it was possible to notice the influence of the presence of zinc in the brass pin, which affected the results of wear and COF. The brass showed less severe wear than copper, being possible to notice the presence of deep grooves on the disc surface when it was tested against copper. The disc surface rubbed against brass did not show those grooves. The results obtained could be justified with conclusions of previous studies, that which proposed that the wear mechanism is sensitive to the presence of zinc in the chemical composition of the copper.



**KEYWORDS**: Copper, brass, wear.

ÍNDICE Pág.

1. INTRODUÇÃO.....1
2. OBJETIVOS.....1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....1
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....4
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....6
5.1. Ensaios do par Cobre-Aço.....6
5.2. Comparação entre o comportamento dos pares cobre e latão VS ferro fundido cinzento.....11
6. CONCLUSÕES ..... 13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....13
Apêndice I.....16
Apêndice II.....17

# 1. INTRODUÇÃO

Os estudos tribológicos que dizem respeito ao cobre e suas ligas vêm ganhando relevância com a divulgação de trabalhos que indicam que a sua presença em materiais de fricção (como em pastilhas e lonas de freio) é prejudicial ao meio-ambiente, principalmente à fauna aquática (Lee e Filip, 2013). Kim et. al., 2012, e Lee e Filip, 2013, mostram que uma série de leis vêm sendo adotadas nos estados norte-americanos de Washington e Califórnia desde 2010 para reduzir significativamente o percentual de cobre utilizado em materiais de fricção. Contudo, a procura por um componente que possa substituir o cobre tem se mostrado difícil, tendo em vista a conhecida importância do mesmo no desempenho de um material de fricção. Kumar e Bijwe, 2011, Osterle et. al., 2010, e Kim et. al., 2012, afirmam que características como difusão térmica e lubricidade em temperaturas elevadas tornam o cobre muito importante na composição de uma pastilha de freio. Jang et. al., 2004, ainda responsabiliza o cobre por estabilizar o coeficiente de atrito em temperaturas elevadas através da formação de óxidos de cobre na interface de desgaste de um sistema de fricção. Lee e Filip, 2013, afirmam que o cobre estabiliza o filme de freio (terceiro corpo), tornando o coeficiente de atrito do material da pastilha de freio estável.

O motivo de estudar o cobre é entender o seu comportamento isoladamente, para que em trabalhos futuros seja possível utilizar esse entendimento para tentar buscar um substituto ao cobre na composição de materiais de fricção, tendo em vista as reduções que vêm sendo impostas pela legislação americana. Paralelamente com a relevância do assunto, vários autores (Eyre e Maynard, 1971, Sexton, 1983, e Rigney et. al., 1984) relatam a dificuldade de caracterizar o comportamento tribológico do contato entre metais devido ao elevado número de variáveis que influenciam o processo. Dentre as variáveis estão a pressão de contato, a relação entre o tempo e a velocidade de deslizamento, propriedades dos materiais e fatores ambientais. Segundo Rigney et. al., 1984, mesmo quando os estudos mantêm algumas destas variáveis constantes, o resultado parece não convergir. Portanto, o presente trabalho tem como objetivo entender o comportamento tribológico destes materiais isoladamente, a fim de entender seus mecanismos de atrito e desgaste. Para isso, pinos de cobre eletrolítico (99% de pureza), e de latão (70% Cu e 30% Zn) foram atritados contra discos de aço SAE 1020, e contra um disco de ferro fundido cinzento no tribômetro do Laboratório de Tribologia (LATRIB) da UFRGS. Os resultados dos testes foram quantificados em termos do nível de desgaste e atrito dos materiais testados. Durante os testes experimentais, foram variados os seguintes parâmetros experimentais: pressão de contato (2,55 MPa, 1,91 MPa, e 1,27 MPa) e velocidade de deslizamento (0,395 m/s, 0,317 m/s, e 0,235 m/s).

# 2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho é realizar uma análise do comportamento tribológico do cobre eletrolítico (99% de pureza) e do latão (70%Cu e 30%Zn) em ensaios de deslizamento contra aço SAE 1020 e ferro fundido cinzento.

# 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Stachowiak e Batchelor, 1993, classificam o desgaste em adesivo, abrasivo, de fadiga, erosivo, de cavitação, corrosivo, oxidativo, de fusão, de impacto e difusivo. Dentre estes, a literatura [Rigney et. al., 1983; Küçükömeroğlu e Kara, 2014] relata que a adesão é a maior responsável pelo volume desgastado de superfícies metálicas. Sexton, 1983, Sexton, 1984, e Krishna Kanth et. al., 1990, ainda consideram o desgaste abrasivo como parte importante no atrito entre duas superfícies metálicas. Segundo Farrell e Eyre, 1970, existem dois tipos de desgaste no contato entre metais: o desgaste moderado e o desgaste severo. O desgaste moderado se caracteriza por uma remoção lenta do topo das asperezas da superfície mais

macia. O desgaste severo se caracteriza por uma remoção de material mais profunda, sendo que a taxa de desgaste nesse caso chega a ser duas vezes maior do que nas condições de desgaste moderado.

Segundo Kato, 1997, o desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície macia é atritada por partículas mais duras, sendo o mecanismo mais encontrado no contato entre metais. A literatura [Khurschov e Babichev, 1960; Mutton e Watson, 1978] reporta que a resistência ao desgaste abrasivo aumenta com a dureza do metal. Stachowiak e Batchelor, 1993, definem a resistência ao desgaste relativa (eixo Y na Fig. 3.1) como sendo uma função da razão entre a dureza do material macio (substrato) e a dureza do material abrasivo.

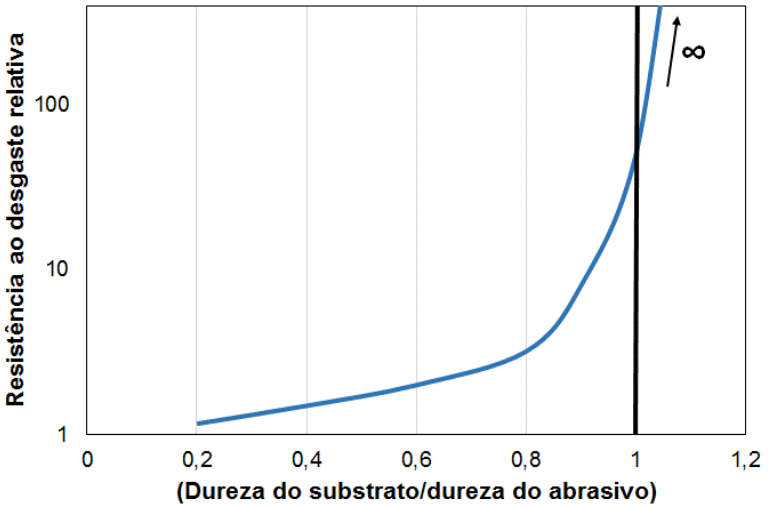



Figura 3.1 – Ilustração qualitativa do comportamento da resistência ao desgaste relativa a 2 corpos do material mais macio com a razão de dureza dos materiais em atrito [Adaptado de: Stachowiak e Batchelor, 1993].

É possível notar a partir da Figura 3.1 que, quanto mais a dureza do substrato se aproxima da dureza do material abrasivo, maior é a resistência ao desgaste do substrato. Nos casos em que a dureza do substrato é maior do que a dureza do material abrasivo (quando a linha azul da Fig. 3.1 cruza a linha preta), percebe-se um aumento muito grande na resistência ao desgaste do substrato, tendendo ao infinito com o aumento da razão de dureza.

Segundo Stachowiak e Batchelor, 1993, o desgaste adesivo é a forma de desgaste mais severa em um contato metal-metal, sendo responsável por destruir os pontos da superfície em contato rapidamente. Sikorski, 1964, relata que elevados níveis de atrito entre metais são normalmente acompanhados por um nível elevado de adesão. Sikorski, 1964, divide os fatores que influenciam a adesão entre metais em fatores mecânicos e fatores físico-químicos. Os fatores mecânicos dividem-se em estrutura cristalina, dureza, pureza, módulo elástico, ponto de fusão, temperatura de recristalização e raio atômico, que, segundo o autor, são fatores que influenciam na tendência de as superfícies desenvolverem grandes áreas de contato. Já fatores como a limpidez das superfícies, afinidade química, o tipo de ligação envolvida e até mesmo a posição dos elementos na tabela periódica se caracterizam como fatores físico-químicos de relevância para o desgaste adesivo.

Andreatch e Tabor, 1959, Anderson, 1960, e Sikorski, 1964, realizaram ensaios de desgaste com superfícies metálicas e relataram que a presença de contaminantes nas superfícies em contato diminui os níveis de adesão, e vice-versa. Bowden e Rowe, 1956, afirmam que os filmes de óxido que se formam naturalmente nos metais previnem o contato real e dificultam o desgaste severo. Segundo os mesmos autores, é possível observar que conforme o nível de contaminação das superfícies em contato diminui, o nível de adesão torna-se muito elevado. Inúmeros estudos da literatura [Buckley, 1981, Sikorski, 1963, Anderson, 1962, Ernst e Merchant, 1940, Milner e Rowe, 1962] relatam a existência de uma dependência da estrutura

cristalina do material com o coeficiente de adesão, conforme pode ser visto na Figura 3.2. O coeficiente de adesão é classificado como a razão entre a força para romper a ligação adesiva e a força de contato entre as superfícies.

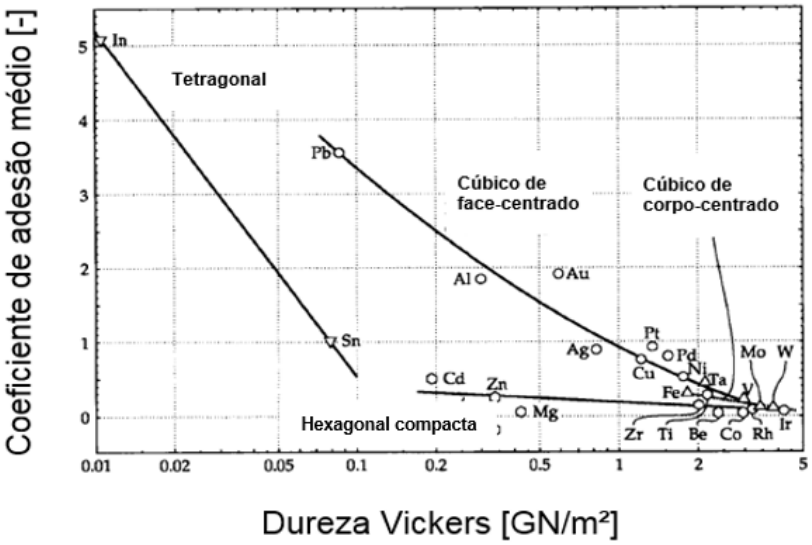



Figura 3.2 – Comportamento do coeficiente de adesão em relação a estrutura cristalina e a dureza [Adaptado de: Sikorski, 1964].

A partir da Figura 3.2 é possível notar que metais com estrutura hexagonal compacta (zinco, por exemplo) mostram menores níveis de adesão do que metais com estrutura cúbica de face-centrada (cobre, por exemplo). Também é possível concluir que há um decréscimo no coeficiente de adesão conforme a dureza do material cresce. Conforme mostra a literatura [Stachowiak e Batchelor, 1993, Ernst e Merchant, 1940] uma possível razão para a diferença na adesão entre metais de similar dureza é a necessidade da existência de algum grau de deformação plástica entre as asperezas antes de o contato real ser estabelecido. Metais com estrutura hexagonal compacta possuem menos planos de deslizamento e, com isso, são menos dúcteis que os outros, e acabam por apresentar menores níveis de adesão e consequentemente menor desgaste.

Buckley, 1981, realizou experimentos de vários metais ferrosos. O autor mostrou uma relação entre a solubilidade sólida dos materiais em contato e os níveis de adesão. Segundo o autor, a força de adesão tende a ser maior no contato entre metais solúveis. Keller e Spalvins, 1962, atestam a mesma coisa, ao mostrar que amostras de materiais solúveis apresentam adesão, enquanto observam ausência de adesão para amostras não-solúveis. Por exemplo, o alumínio possui solubilidade de 22% no ferro, e a força de adesão do contato entre os dois é 4 vezes maior do que para o contato entre prata e ferro, que possuem 0,13% de solubilidade. Outros estudos [Gee e Zaat, 1962, Pamies-Teixeira et. al., 1977] atestam a influência da pureza e de elementos de liga nos níveis de adesão em testes com cobre. Segundo os autores, existe um aumento nos níveis de adesão para materiais mais puros.

# 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi realizada uma metodologia de ensaios para permitir comparar, para diversas variações de pressão de contato e velocidade de deslizamento, o coeficiente de atrito, a variação de massa dos pinos de cobre, e a quantidade de resíduo formado em cada etapa.

A Fig. 4.1 apresenta uma foto do disco e uma foto do pino. As dimensões dos pinos são: 30 mm de altura e 10 mm de diâmetro, enquanto o disco tinha 159 mm de diâmetro, sendo o pino ensaiado no raio de 28 mm. A Tabela 4.1 apresenta algumas propriedades mecânicas do disco de aço e das amostras de cobre e de latão.

a) b)

Figura 4.1 – a) Disco de aço e b) pino de cobre utilizados nos ensaios.

Tabela 4.1 – Propriedades mecânicas do aço, ferro fundido cinzento, cobre e latão empregados nos ensaios [Adaptado de: Callister Jr. e Rethwisch, 2016].

| **Propriedade** | **Cobre eletrolítico** | **Latão (70Cu 30Zn)** | **Aço SAE 1020** | **Ferro fundido cinzento** |
|---|---|---|---|---|
| Tensão de escoamento [MPa] | 69 | 137 | 180 | 160 |
| Tensão máxima [MPa] | 200 | 340 | 380 | 210 |
| Ductilidade [%] | 45 | 57 | 25 | 4 |
| Dureza [HB] | 45 | 80 | 111 | 200 |

Os ensaios de desgaste foram realizados no tribômetro do Laboratório de Tribologia da UFRGS (LATRIB). A metodologia empregada consistiu em uma etapa chamada de pré-ensaio, uma etapa de ensaio, e uma etapa de pós-ensaio. Um detalhamento de cada etapa é apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Detalhamento de cada etapa da metodologia dos ensaios.

| Pré-ensaio | | | Ensaio | | | | | Pós-ensaio | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Material do disco | Material do pino | Velocidade tangencial [m/s] | Pressão de contato [MPa] | Tempo de deslizamento [s] | | | |
| **1º Passo**: alinhamento do disco | **2º Passo**: lixamento do disco | **3º Passo**: alinhamento do disco | Aço SAE 1020 | Cobre | 0,395 | 2,55 | 1000 | Medição da massa final do pino | Medição da massa do resíduo da frenagem | Interferometria das trilhas de desgaste dos discos |
| | | | | | | 1,91 | | | | |
| | | | | | | 1,27 | | | | |
| | | | | | 0,317 | 2,55 | 1246 | | | |
| | | | | | | 1,91 | | | | |
| | | | | | | 1,27 | | | | |
| | | | | | 0,235 | 2,55 | 1681 | | | |
| | | | | | | 1,91 | | | | |
| | | | | | | 1,27 | | | | |
| | | | Ferro fundido cinzento | Latão | 0,395 | 2,55 | 1000 | | | |
| | | | | Cobre | 0,395 | 2,55 | 1000 | | | |

O primeiro passo do pré-ensaio consistiu em um alinhamento do disco de aço. O desalinhamento é medido com um relógio comparador, e os ajustes eram feitos de forma que o desalinhamento não passasse de 20 µm na direção axial, conforme Figura 4.2.

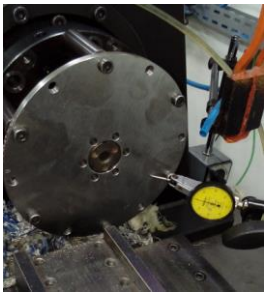


Figura 4.2 – Detalhe da medição do desalinhamento do desalinhamento do disco.

O segundo passo tinha como objetivo a uniformização da condição superficial da contraparte (disco de aço ou ferro fundido cinzento). Tal procedimento fez uso de lixas que variavam sua granulação entre 180 e 1500, que eram pressionadas durante 30 segundos contra o disco de aço, que girava a 200 rpm. Posteriormente foi utilizada uma estopa para limpeza de resíduos na superfície do disco. Com isso, obteve-se uma rugosidade Ra menor que 0,20 µm. O terceiro passo consistiu na medida da massa do pino a ser ensaiado, para posterior cálculo da perda de massa do mesmo.

Para analisar o comportamento do cobre contra aço SAE 1020, foram empregadas 3 velocidades de deslizamento (0,395 m/s, 0,317 m/s e 0,235 m/s), sendo que para cada velocidade eram aplicados 3 níveis de pressão de contato (2,55 MPa, 1,91 MPa e 1,27 MPa). Já para comparar o comportamento do latão e do cobre, foram realizados 2 ensaios contra ferro fundido cinzento, cada um envolvendo um tipo de pino, com velocidade de deslizamento de 0,395 m/s e 2,55 MPa. A distância de deslizamento foi fixada em 395 m para que se pudesse comparar resultados de desgaste e atrito entre as diferentes condições, sendo esse parâmetro ajustado a partir do tempo de deslizamento.

Durante os ensaios, o resíduo que se desprendia do disco e dos pinos foi coletado, e, ao final dos testes, a sua massa foi medida. O desgaste dos pinos foi medido através da perda de massa por meio de uma balança de precisão com resolução de 0,1 mg. Finalmente, o desgaste dos discos foi verificado através de interferometria óptica utilizando um interferômetro da marca *Bruker* modelo *CountorGT-K3D* com resolução de 0,38 µm nos 3 eixos (x, y, z). Um exemplo de resultado da interferometria de uma das trilhas de desgaste pode ser visto na Figura 4.3.

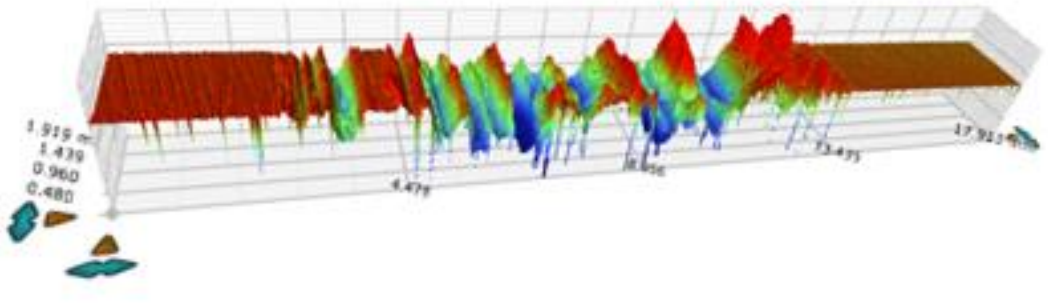



Figura 4.3 – Exemplo de resultado do desgaste de um disco de aço ensaiado contra cobre obtido por meio de interferometria óptica.

O interferômetro foi configurado para identificar profundidades de até 500 µm, onde o mesmo faz uso de franjas de interferência para medir a profundidade em toda a extensão radial das trilhas desgastadas dos discos. Foram realizadas 3 medidas de interferometria para cada

superfície dos discos. A fim de calcular o volume desgastado das trilhas do disco, linhas foram traçadas na direção radial à imagem do disco obtida por interferometria. Com isso, obteve-se o perfil bidimensional, o qual foi empregado na discretização ilustrada na Figura 4.4.

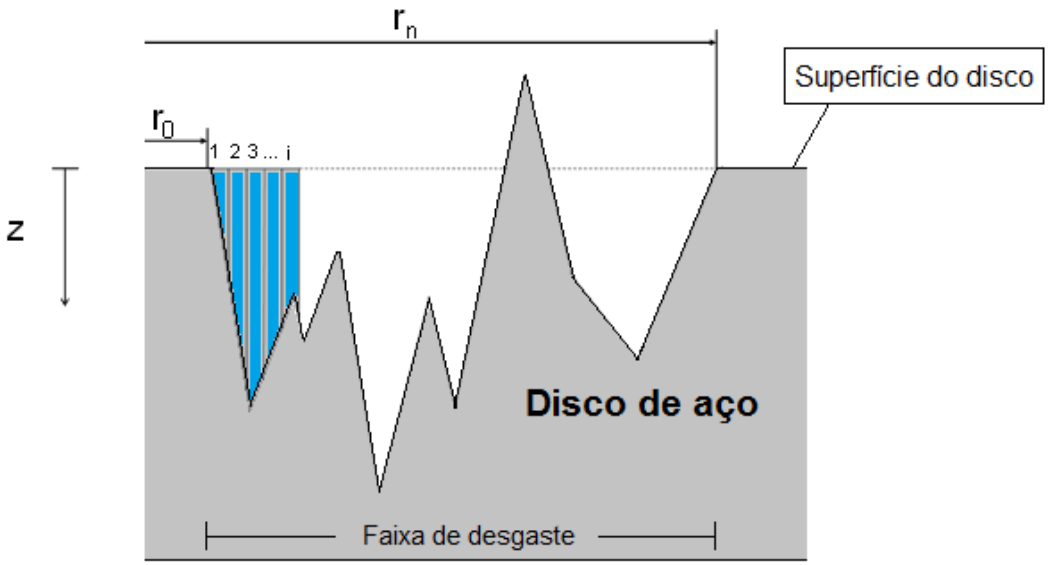



Figura 4.4 – Ilustração da discretização da superfície desgastada a partir do perfil obtido por interferometria.

O volume de cada região 1,2,3, a i (área preenchida em azul na Fig. 4.4) foi calculado, levando-se em conta a profundidade *z*, a diferença no raio da região, e a posição radial da região no disco, conforme mostra a Eq. 4.1.

$$V = \sum_{i=0}^{n-1} \pi({r_{i+1}}^2 - {r_i}^2)\frac{(z_{i+1} + z_i)}{2}\ [mm^3] \tag{4.1}$$

Onde *V* é o volume total desgastado da região, *r* é a distância do ponto obtido na interferometria até o centro do disco, *z* é a profundidade medida pelo interferômetro em relação ao plano da superfície não desgastada (linha pontilhada da Fig. 4.4), e *n* é o número de pontos coletados pelo *software* que controla o equipamento e coleta os dados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Ensaios do par Cobre-Aço

Os resultados de desgaste dos pinos de cobre atritados contra aço em função da pressão de contato e da velocidade de deslizamento são apresentados na Figura 5.1.

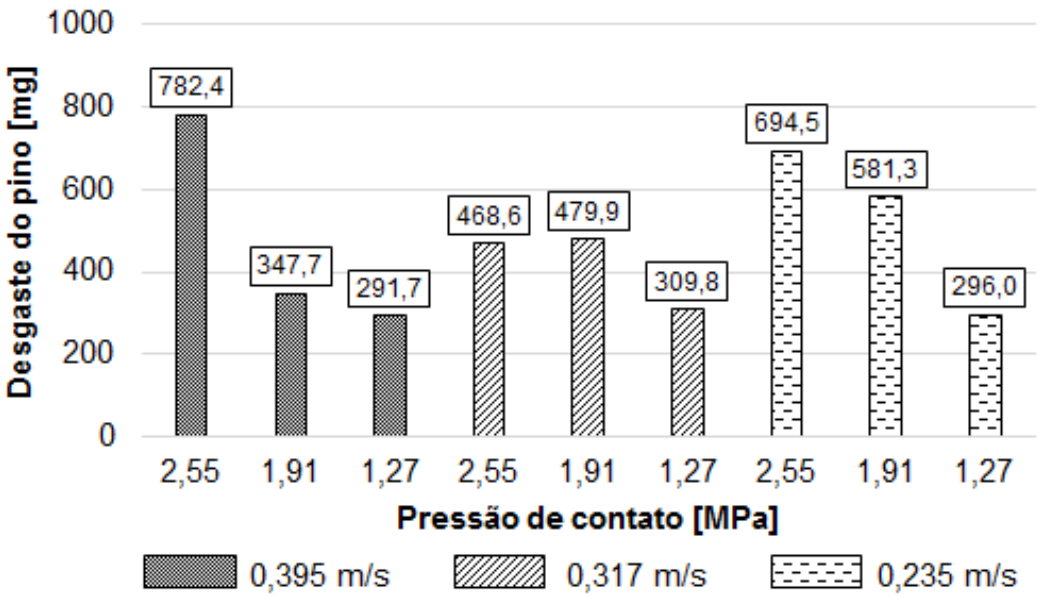



Figura 5.1 – Desgaste do pino de cobre atritado contra aço em função das condições dos ensaios.

Pode-se perceber, a partir da Figura 5.1, que o desgaste do pino é mais sensível à pressão do que a velocidade de deslizamento, resultado que está de acordo com as conclusões do estudo de Syed Asif et. al., 1990. Da mesma forma, a massa de resíduo coletada nos ensaios de desgaste (Figura 5.2) se mostrou mais sensível à pressão de contato do que à velocidade tangencial do disco.

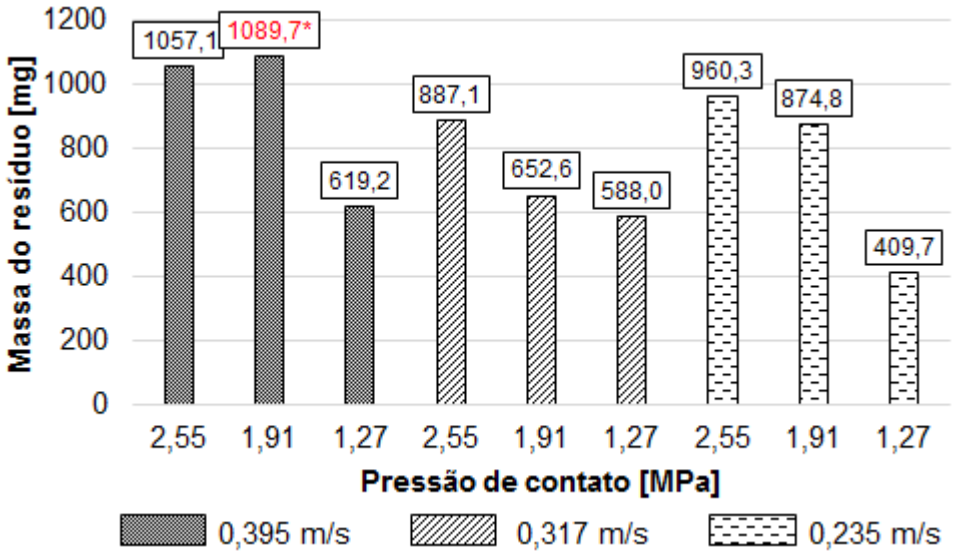



Figura 5.2 – Resíduo formado no atrito entre cobre e aço durante o ensaio de desgaste em função das condições empregadas.

O valor de resíduo destacado por meio de "*" na Figura 5.2 é elevado porque durante este ensaio houve, acidentalmente, vazamento de óleo do tribômetro para dentro do recipiente que coletava os resíduos. Portanto, este ponto pode ser considerado errático.

A Figura 5.3 demonstra o aspecto final da superfície de cada um dos pinos de cobre após os ensaios de desgaste. A fim de facilitar a análise, as fotos foram dispostas de forma que a

pressão de contato seja aumentada da direita para a esquerda e a velocidade de deslizamento seja reduzida de cima para baixo.

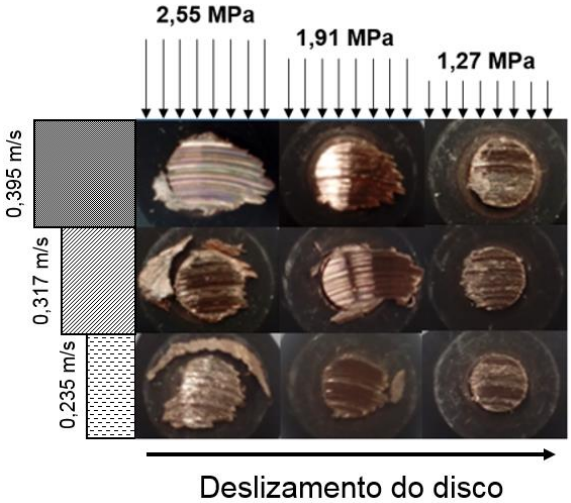



Figura 5.3 – Aspecto do desgaste das superfícies dos pinos de cobre depois dos ensaios contra aço.

É possível perceber, a partir da Figura 5.3, que em alguns ensaios houve a formação de uma casca de cobre, no mesmo sentido do deslizamento do disco. Syed Asif et. al., 1990, observaram tal efeito em seus experimentos de cobre contra aço, e Krishna et. al., 1990, em experimentos com ligas de alumínio. Segundo estes autores, este comportamento é devido a elevados graus de deformação plástica ocasionados nos ensaios de deslizamento.

Moshkovich et. al., 2014, também observaram a presença de elevados níveis de deformação plástica na superfície de pinos de cobre ensaiados contra disco de aço SAE 1040. Alguns autores [De Gee e Zaat, 1962, Pamies-Teixeira et. al., 1977] atribuem a propensão ao acontecimento de elevada deformação plástica ao baixo nível de dureza do pino paralelamente com uma elevada pressão de contato do ensaio. Desta forma, quanto maior a pressão, maior será a facilidade de deformar a base das asperezas em contato. É possível perceber que para a pressão de contato de 1,27 MPa não houve a formação de cascas, sendo que estes ensaios também apresentaram menores desgastes do pino de cobre (Fig. 5.1) e menores formações de resíduo (Fig. 5.2). A Figura 5.4 mostra que nesta condição de menor pressão obteve-se também menores coeficientes de atrito médio.

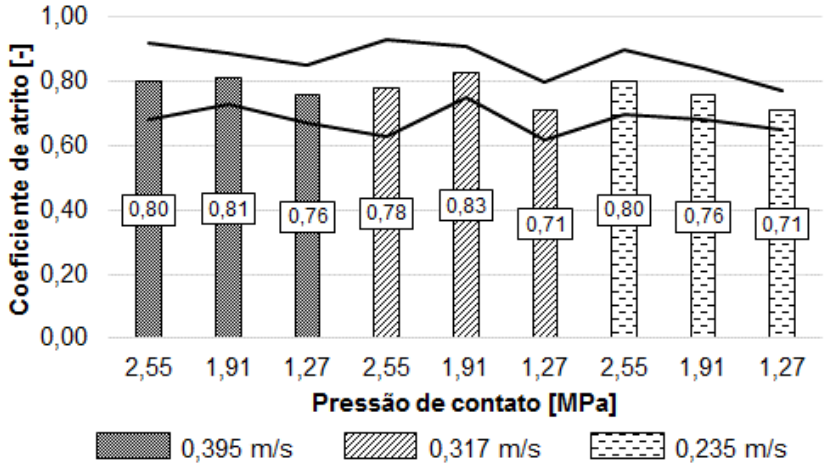
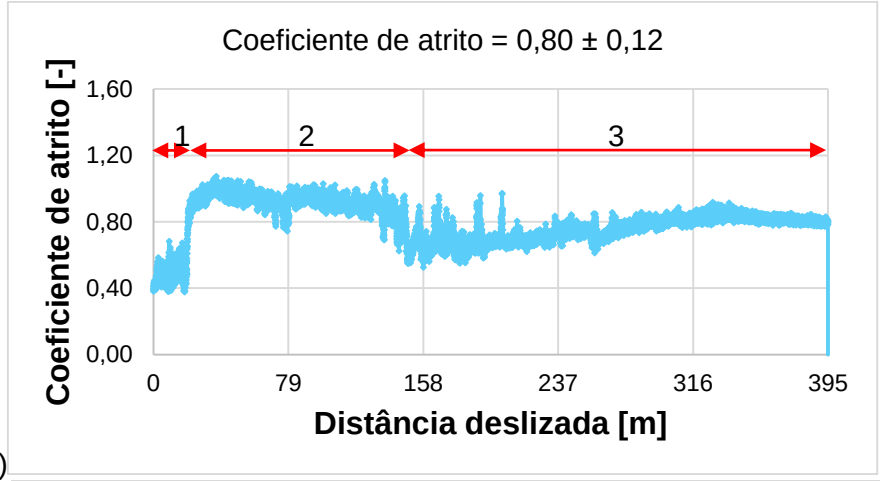


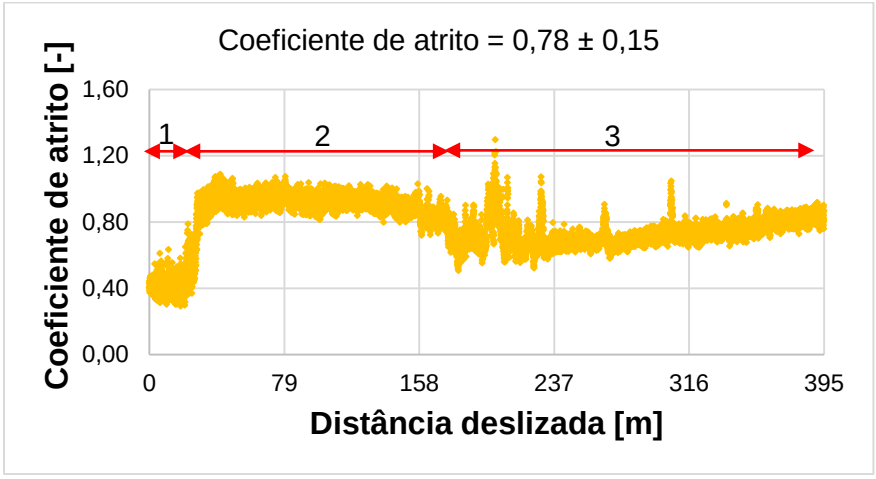

Figura 5.4 – Coeficiente de atrito médio medido nos ensaios de desgaste em função das condições dos ensaios. As linhas representam o desvio padrão.

É possível supor que 1,27 MPa não é uma pressão de contato suficiente para fazer com que a superfície do cobre sofra grandes deformações plásticas, com consequente formação de cascas. Krishna et. al., 1990, também encontraram uma pressão de contato mínima para o aparecimento de deformações plásticas para corpos de prova de alumínio.

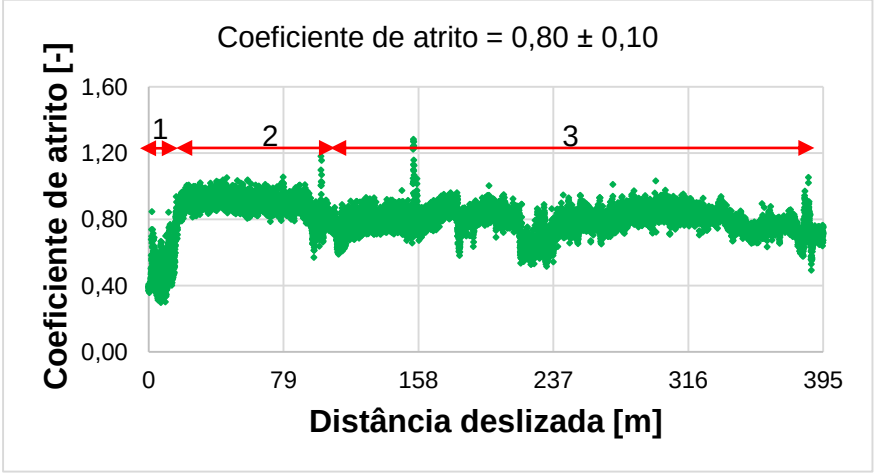
A Figura 5.5 apresenta as curvas de COF avaliadas na condição de maior pressão (2,55 MPa) e nas 3 condições de velocidade. As demais curvas de COF são mostradas no Apêndice I.




a)




b)




c)

Figura 5.5 – Coeficiente de atrito dos ensaios de cobre contra aço com pressão de contato de 2,55 MPa: (a) 0,395 m/s, (b) 0,317 m/s, e (c) 0,235 m/s de velocidade de deslizamento.

Analisando os gráficos da Figura 5.5, é possível perceber a presença de 3 regiões com comportamento de coeficiente de atrito distintos. A primeira região é caracterizada por um coeficiente de atrito significativamente menor, e é onde devem ser formados os primeiros sulcos no par tribológico. Durante a segunda etapa foi possível notar bastante vibração vinda do tribômetro. Nesta etapa, ocorreu um aumento brusco do coeficiente de atrito, que chegou a se aproximar de 1. Supõe-se que esta região se caracteriza por ser tribologicamente instável, e por proporcionar transferência de material do disco de aço para o pino de cobre, conforme relatam os estudos de Syed Asif et. al, 1990, tendo elevados níveis de adesão. A instabilidade desta região pode ser explicada pela formação de sulcos decorrentes da primeira etapa e pela remoção dos contaminantes da superfície do disco, que inicialmente dificultavam a adesão. A terceira região é caracterizada por um comportamento aparentemente aleatório. Estas três etapas não se apresentam de forma tão clara nos ensaios com pressões de contato menores (Apêndice I). É possível perceber também que estes ensaios – com o nível de pressão de contato mais elevado – tiveram o desvio padrão mais elevado.

Outras formas de avaliar os resultados foram exploradas, como, por exemplo, a largura da trilha de desgaste formada durante os ensaios, que se encontra no Apêndice II. Porém, tanto esta como as outras formas não mostraram correlação clara com os parâmetros dos ensaios.

A Figura 5.6 apresenta o desgaste da trilha de deslizamento do disco de aço atritado contra pinos de cobre, em função dos parâmetros dos ensaios. O valor do desgaste foi calculado a partir do resultado da interferometria e da Equação 4.1.

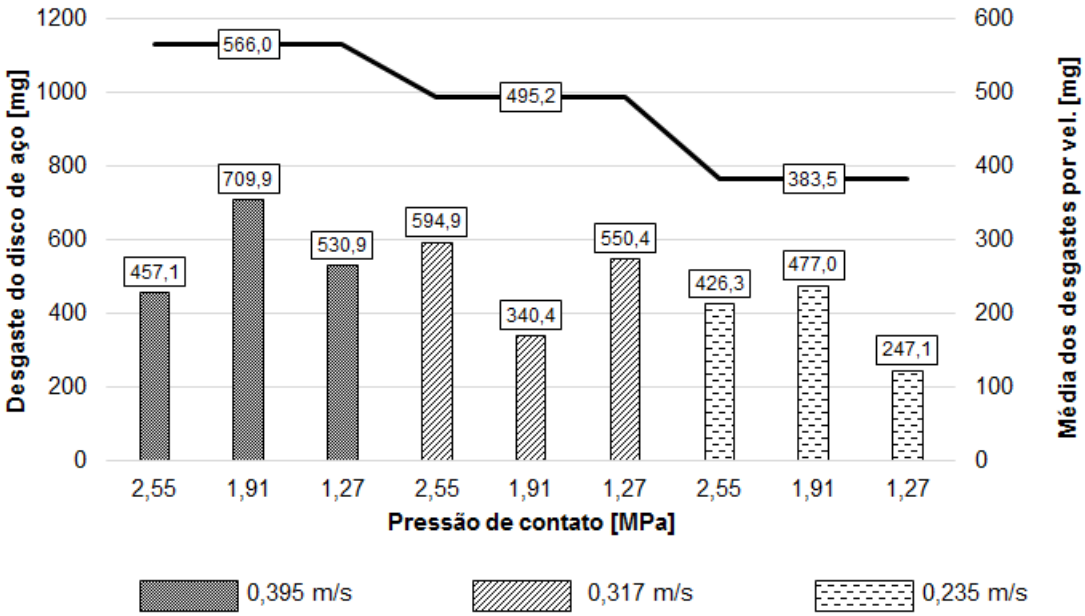



Figura 5.6 – Desgaste das trilhas dos discos de aço em função das condições dos ensaios.

É possível notar, a partir da Figura 5.6, que o desgaste do disco de aço é mais sensível a velocidade de deslizamento do que a pressão de contato. Este comportamento é o oposto do observado para o desgaste dos pinos de cobre (Fig. 5.1).

5.2. Comparação entre o comportamento dos pares cobre e latão VS ferro fundido cinzento

A Figura 5.7 traz os resultados de desgaste do pino e de coeficiente de atrito para o ensaio com o pino de cobre e para o ensaio com o pino de latão contra o disco de ferro fundido cinzento.

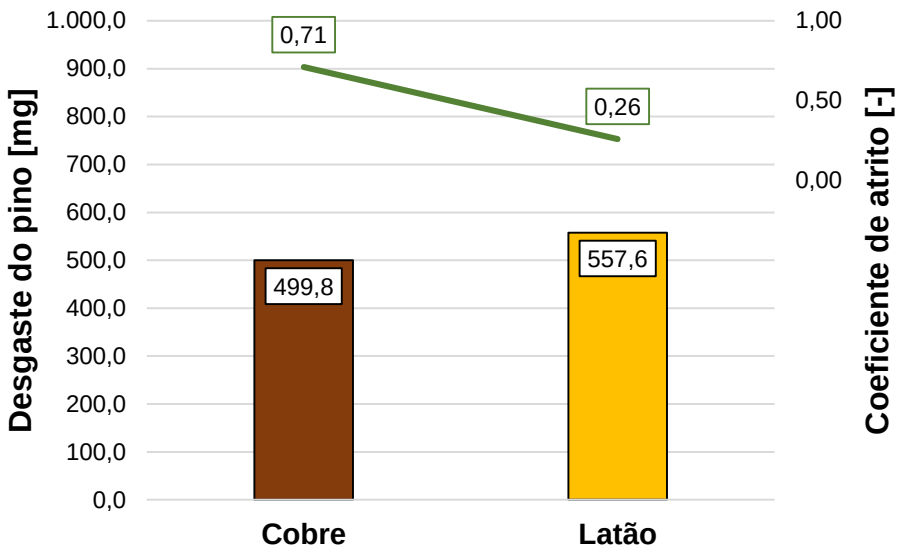
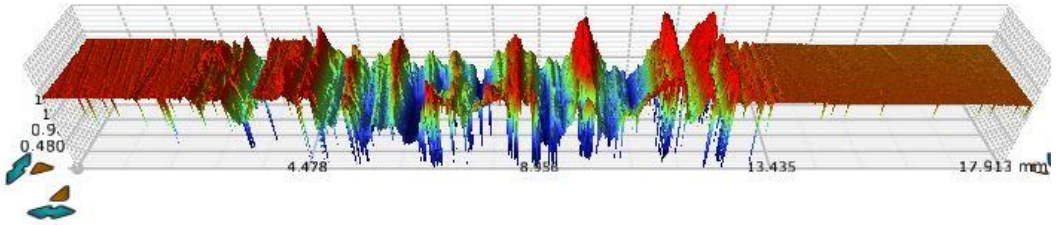


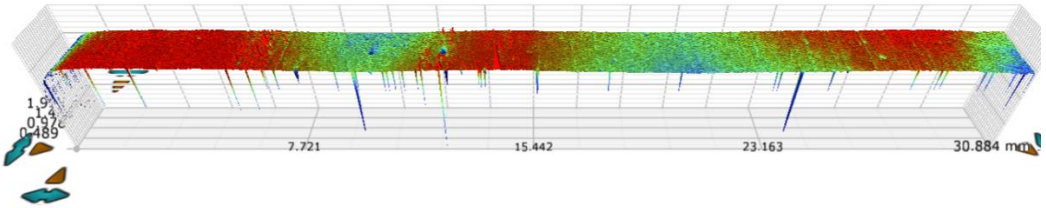

Figura 5.7 – Resultado de coeficiente de atrito médio e desgaste do pino para o ensaio com pino de cobre e o ensaio com pino de latão atritados contra ferro fundido cinzento.

É possível observar que o ensaio envolvendo o latão apresentaram menor coeficiente de atrito do que o ensaio envolvendo o cobre, e que os pinos de latão apresentaram uma maior perda de massa em comparação ao cobre.

A Figura 5.8 apresenta os perfis obtidos a partir da interferometria para os discos de ferro fundido atritados contra cobre e latão depois dos ensaios.




**Cobre**




**Latão**

Figura 5.8 – Perfis das trilhas de desgaste obtidos a partir da interferometria das superfícies dos discos de ferro fundido cinzento depois do ensaio contra pino de cobre e pino de latão.

É possível concluir, a partir da Figura 5.8, que o disco atritado com cobre apresenta sulcos profundos em sua trilha de desgaste, enquanto é possível notar a ausência de sulcos no disco atritado com latão.

De Gee e Zaat, 1962 e Pamies-Teixeira et. al., 1977, em seus testes com ligas de cobre, atribuem os menores níveis de desgaste do contracorpo a um aumento na dureza dos pinos, o que está de acordo com os dados de dureza da Tabela 4.1, que indica que o latão é mais duro que o cobre. Pamies-Teixeira et. al., 1977, explicam que a dureza aumenta a capacidade das asperezas – que é onde se estabelece o contato – de suportar cargas, dificultando a quebra das mesmas. Este comportamento também explica o fato de o pino de latão não ter formado uma casca, conforme mostrado na Figura 5.9. O fato de as asperezas serem mais resistentes no pino de latão diminui a deformação plástica das mesmas, dificultando a formação de cascas. Paralelamente, De Gee e Zaat, 1962, mostraram que o volume de material transferido do pino para o disco aumenta conforme o percentual de zinco aumenta na amostra de latão. Tal fato explica o desgaste do pino de latão ser maior do que o desgaste do pino de cobre, conforme apresentado na Figura 5.7.

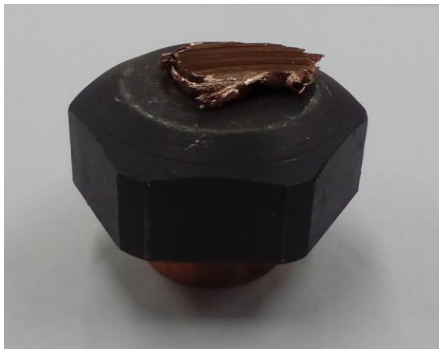
a) b) 

Figura 5.9 – Pinos a) de latão e b) de cobre depois dos ensaios contra ferro fundido cinzento.

De Gee e Zaat, 1962, relatam que ocorre a formação de óxido de latão a partir de certos níveis de zinco presentes no pino. Para estes casos acontece a formação de uma camada semi-contínua de latão na superfície do disco. O desgaste então acontece pela remoção das partículas de latão da superfície do disco, o que acaba por não formar sulcos na região atritada, conforme pôde ser visto na Figura 5.8 e também é mostrado pela Figura 5.10

.

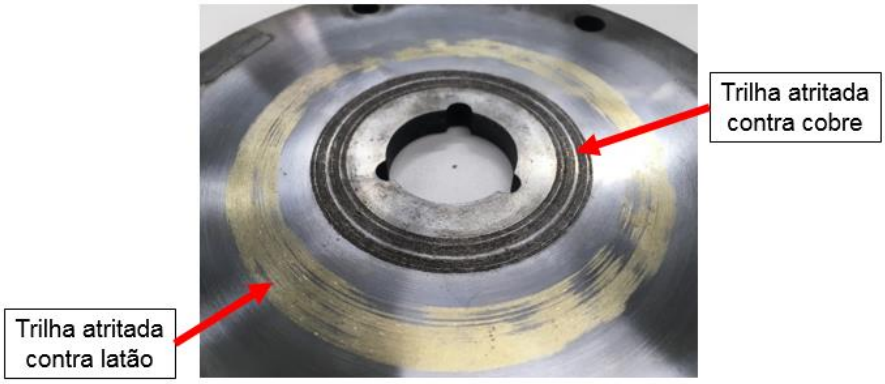



Figura 5.10 – Superfície do disco de ferro fundido, destacando as trilhas atritadas contra latão e contra cobre.

Ainda segundo De Gee e Zaat, 1962, para os casos onde há pouco ou nenhum nível de zinco na composição da liga de cobre (que é o caso do cobre puro), ocorre a formação de fragmentos altamente aderentes, causando deformação plástica, que acaba por formar sulcos na superfície do disco e cascas no pino. Os sulcos profundos do disco acontecem no caso do

atrito contra cobre puro porque neste caso não há a presença de óxido de latão e, portanto, há pouca transferência de material do pino para o disco. Logo, com a ausência de latão na superfície do disco, o desgaste ocorre pela remoção de material da própria trilha do disco, ocasionando elevado desgaste do mesmo.

## 6. CONCLUSÕES

Com a metodologia empregada foi possível analisar o comportamento tribológico do cobre e do latão em ensaios contra aço SAE-1020 e ferro fundido cinzento. Foi possível verificar que, dentre as variáveis analisadas, a pressão de contato é a que mais influencia nos níveis de desgaste dos pinos de cobre, e nos níveis de COF dos ensaios. Foi possível notar a existência de uma pressão de contato mínima (1,27 MPa, no presente estudo) para a formação de cascas nas superfícies dos pinos de cobre, sendo que, abaixo destes níveis de pressão, o COF, o desgaste do pino, e o resíduo formado mostraram-se menores. Foi possível encontrar justificativas na literatura para tais resultados. Para os discos de aço atritados contra cobre eletrolítico, foi possível notar que o desgaste dos mesmos não possui uma sensibilidade tão grande com a pressão de contato, sendo mais sensível a velocidade de deslizamento.

Foi possível notar grandes diferenças nos resultados ao ensaiar amostras de latão e amostras de cobre contra disco de ferro fundido cinzento. Percebeu-se que o coeficiente de atrito do ensaio envolvendo o cobre foi superior ao do ensaio envolvendo latão. Foi notória também a diferença no desgaste das trilhas de deslizamento, sendo que o disco atritado contra o cobre apresentou sulcos de desgaste profundos em sua superfície, enquanto que a superfície atritada contra o latão não apresentou tal efeito. Tais resultados estão de acordo com estudos prévios realizados por outros autores.

Para estudos futuros, sugere-se que sejam explorados outros fatores, tais como: (i) a rugosidade inicial do disco, que, segundo De Gee e Zaat, 1962, exerce forte influência nos resultados de desgaste, e no comportamento tribológico do cobre e suas ligas; (ii) diferentes níveis de pureza dos pinos de cobre sejam avaliados em atrito contra aço e ferro fundido cinzento; (iii) amostras de latão com diferentes percentuais de zinco sejam ensaiadas contra aço e ferro fundido cinzento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, O. L., “**Adhesion of inorganic solids**”, Proceedings of the Symposium on Physics and Nondestructive Testing, Southwest Research Institute, pp. 471, 1962.

Anderson, O. L., “**The role of surface shear strains in the adhesion of metals I**”, Wear 3, pp. 253, 1960.

Andreatch, P., Anderson, O. L., “**New device for measuring the adhesion between metallic rods**”, Review of Scientific Instruments 30, pp. 498-499, 1959.

Bowden, F. P., Rowe, G. W., “**The adhesion of clean metals**”, Proceedings of the Royal Society of London A233, pp. 429, 1956.

Buckley, D. H., “**Surface effects on adhesion, friction, wear and lubrication”**, Elsevier, 1981.

Callister Jr., W. D., Rethwisch, D. G., “**Ciência e Engenharia de Materiais – Uma introdução**”, LTC, 9ª Edição, 2016.

De Gee, A. W. J., Zaat, J. H., “**Wear of Copper alloys against Steel in Oxygen and Argon**”, Wear 5, pp. 257-274, 1962.

Ernst, H., Merchant, M. E., "**Surface friction of clean metals. A basic factor in the metal cutting process**", Proceedings of the Special Summer Conference on Friction and Surface Finish, Massachusetts Institute of Technology, 1940.

Eyre, T. S., Maynard, D., "**Surface aspects of unlubricated metal-to-metal wear**", Wear 18, pp. 301-310, 1971.

Farrell, R. M., Eyre, T. S., "**The relationship between load and sliding distance in the initiation of mild wear in steels**", Wear 15, pp. 359-372, 1970.

Jang, H., Ko, K., Kiim, S. J., Basch, R. H., Fash, J. W., "**The effect of metal fibers on the friction performance of automotive brake friction materials**", Wear 256, pp. 406-414, 2004.

Kato, K., "**Abrasive wear of metals**", Tribology International 30, pp. 333-338, 1997.

Keller, D. V., Spalvins, T., "**Adhesion between atomically clean metallic surfaces**", OTS N62-15678, 1962.

Khurschov, M. M., Babichev, M. A., "**Research on wear of metals**", National Engineering Laboratory, Capítulo 8, 1960.

Kim, S., Lee, J., Han, J., Kim, Y., Jang, H., "**The role of Copper on the friction and wear performance of automotive brake friction materials**", Manufacture 5, pp. 9-18, 2012.

Krishna Kanth, V., Pramila Bai, B. N., Biswas, S. K., "**Wear mechanisms in a hypereutectic Aluminum Silicon alloy sliding against Steel**", Scripta Mettalurgica et Materialia 24, Pergamon Press, pp. 267-272, 1990.

Küçükömeroğlu, T., Kara, L., "**The friction and wear properties of CuZn39Pb3 alloy under atmospheric and vacuum conditions**", Wear 309, pp. 21–28, 2014.

Kumar, M., Bijwe, J., "**Non-asbestos organic (NAO) friction composites: role of copper; its shape and amount**", Wear 270, pp. 269-280, 2011.

Lee, P.W., Filip, P., "**Friction and wear of Cu-free and Sb-free environmental friendly automotive brake materials**", Wear 302, pp. 1404-1413, 2013.

Milner, D. R., Rowe, G. W., "**Fundamentals of solid-phase welding**", Metallurgical Reviews 7, pp. 433, 1962.

Moshkovich, A., Perfilyev, V., Lapsker, I., Rapoport, L., "**Friction, wear and plastic deformation of Cu and α/β brass under lubrications conditions**", Wear 320, pp. 34-40, 2014.

Mutton, P. J., Watson, J. D., "**Some effects of the microstructure on the abrasion resistance of metals**", Wear 48, pp. 385-398, 1978.

Osterle, W., Prietzel, C., Kloß, H., Dmitriev, A. I., "**On the role of copper in brake friction materials**", Tribology International 43, pp. 2317-2326, 2010.

Pamies-Teixeira, J. J., Saka, N., Suh, N. P., "**Wear of Copper-based solid solutions**", Wear 44, pp. 65-75, 1977.

Rigney, D. A., Chen, L. H., Naylor, M. G. S., "**Wear processes in sliding systems**", Wear 100, pp. 195-219, 1984.

Sexton, M. D., "**A study of wear in Cu-Fe systems**", Wear 94, pp. 275-284, 1984.

Sexton, M. D., "**The interaction between two wearing surfaces I: Copper sliding on Cu-Be and Cu-Be sliding on Cu-Be**", Wear 85, pp. 375-390, 1983.

Sikorski, M. E., "**Correlation of the coefficient of adhesion with various physical and mechanical properties of metals**", Journal of Basic Engineering 85, pp. 279-285, 1963.

Sikorski, M. E., "**The adhesion of metals and factors that influence it**", Wear 7, pp. 144-162, 1964.

Stachowiak, G.W., Batchelor, A.W., "**Engineering Tribology**", Tribology Series 24, 1993.

Syed Asif, S. A., Biswas, S. K., Pramila Bai, B. N., "**Transfer and transitions in dry sliding of Copper against Steel**", Scripta Metallurgica et Materialia 24, Pergamon Press, pp. 1351-1356, 1990.

APÊNDICE I

Nas figuras abaixo estão representados o comportamento do coeficiente de atrito em função da distância deslizada para os ensaios. As condições de cada ensaio estão representadas no topo de cada gráfico.

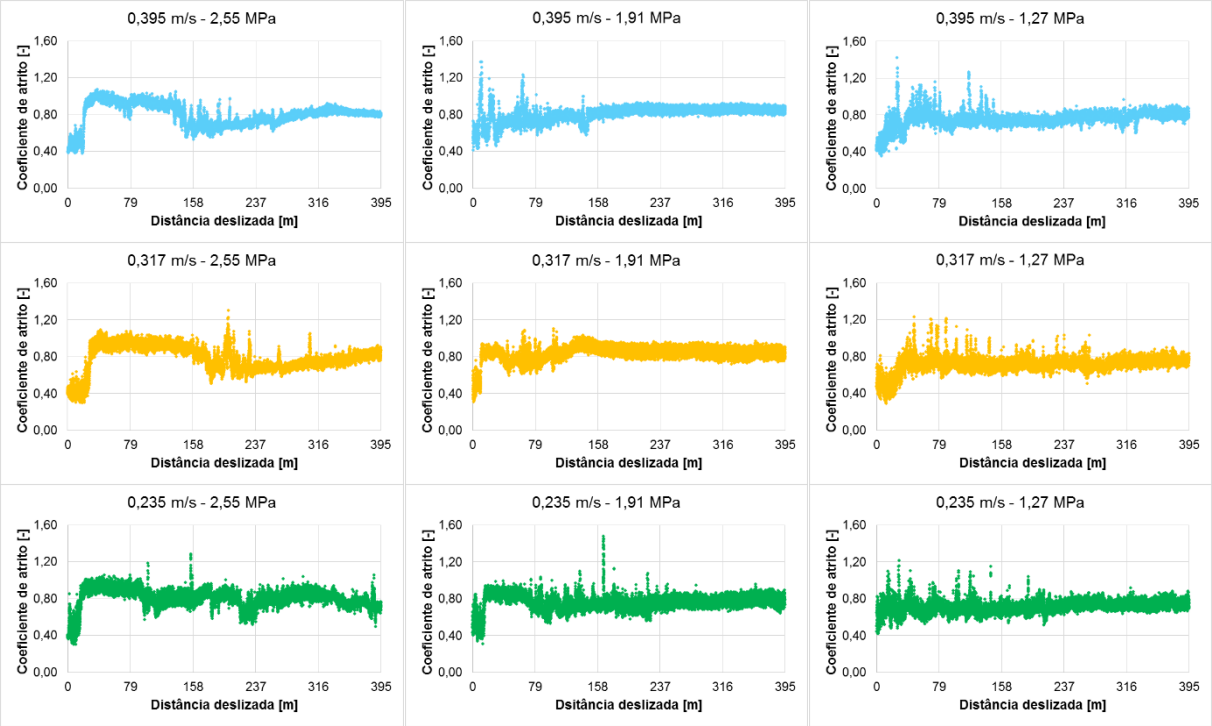



Figura I.1 – Comportamento do coeficiente de atrito em função da distância deslizada para cada um dos ensaios.

A Tabela I.1 abaixo mostra o coeficiente de atrito médio e o desvio padrão do mesmo para cada um dos ensaios.

Tabela I.1 – Média e desvio padrão do coeficiente de atrito em função das condições de cada ensaio.

| Velocidade de deslizamento [m/s] | Pressão de contato [MPa] | | |
|---|---|---|---|
| | 2,55 | 1,91 | 1,27 |
| **0,395** | 0,80 ± 0,12 | 0,81 ± 0,08 | 0,76 ± 0,09 |
| **0,317** | 0,78 ± 0,15 | 0,83 ± 0,08 | 0,71 ± 0,09 |
| **0,235** | 0,80 ± 0,10 | 0,76 ± 0,08 | 0,71 ± 0,06 |

APÊNDICE II

A Figura II.1 mostra a vista superior do resultado gráfico de uma interferometria de uma das superfícies de um dos discos de aço ensaiados contra cobre.

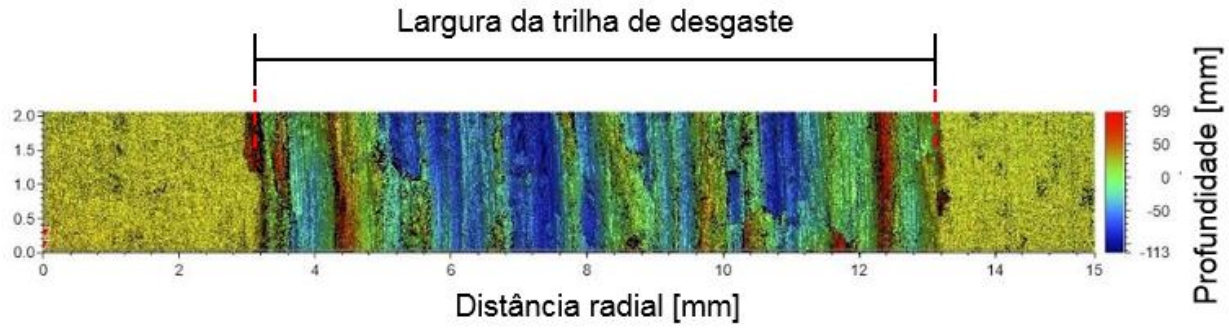



Figura II.1 – Vista superior do resultado de uma interferometria de um dos discos de aço.

A partir da observação da profundidade da superfície, era possível demarcar a largura da trilha de desgaste formada em cada ensaio, conforme indicado na Figura II.1. Os resultados da largura de cada ensaios estão representados na Figura II.2.

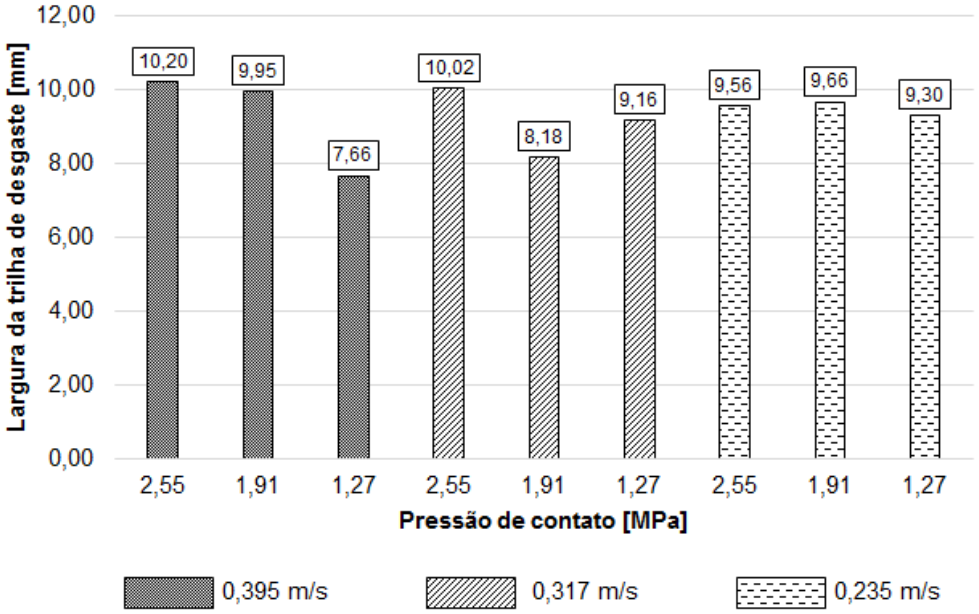



Figura II.2 – Resultados da largura da trilha de desgaste formada durante os ensaios em função das condições ensaiadas.