

Henrique Boschetti Pereira

Ensaio pino sobre disco do latão 270, 260 e do cobre sobre aço H13

Trabalho de Conclusão de Curso
Apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo
para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia
Metalúrgica.

Orientador: Hélio Goldenstein

São Paulo

2014

DEDALUS - Acervo - EPMT



31800008756

TF-2014

P 414 e

H 2014 J

2675230

FICHA CATALOGRÁFICA

Pereira, Henrique Boschetti

**Ensaio pino sobre disco do latão 270, 260 e do cobre sobre aço H13
H. B. Pereira. São Paulo, 2014.**

73 páginas.

**Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais.**

**1. Pino-disco 2. Latão 3. Cobre 4. Desgaste 5. Atrito I. Universidade de
São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia
Metalúrgica e de Materiais II.t.**

A escuridão cobria o mundo e um herói, Azor Ahai, foi escolhido para lutar contra ela. Porém, para desempenhar a tarefa, ele precisaria de uma espada digna de herói. Assim, Azor Ahai trabalhou por trinta dias e trinta noites até forjar sua espada. No entanto, quando ele mergulhou a lâmina na água, a espada se quebrou. Ele não era de desistir facilmente, então começou de novo.

Na segunda vez, ele levou cinquenta dias e cinquenta noites para fazer uma lâmina ainda melhor do que a primeira. Para temperá-la, dessa vez, capturou um leão e enfiou a lâmina no coração da fera, mas o aço quebrou mais uma vez.

Na terceira vez, ele trabalhou com o coração apertado, pois já sabia de antemão o que teria de fazer. Desta vez, após trabalhar na lâmina por cem dias e cem noites, ele chamou a esposa, Nissa Nissa, e pediu que ela descobrisse o peito. Ele enfiou a espada no coração da esposa, e a alma e a coragem dela se combinaram com o aço da espada, criando a Luminífera.

A lenda da Luminífera – As Crônicas de Fogo e Gelo – George R. R. Martin

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador professor doutor Hélió Goldenstein, ao professor doutor Amilton Sinatora e ao professor doutor Cesar Azevedo.

Agradeço também aos membros do Laboratório de Fenômenos de Superfície que me ajudaram bastante na realização do trabalho, em especial aos mestrados Gustavo Tressia e Juan Acero.

Sou grato também pelo suporte que minha mãe, Ana Angela Boschetti, e meu pai, Diamantino Alves Correia Pereira.

Resumo

O anel sincronizado de uma transmissão de automóveis tem como objetivo a sincronia das engrenagens e atua na aceleração ou na desaceleração das mesmas. Para tais fins, os anéis são submetidos ao deslizamento com interface metal x metal com altas pressões, portanto o completo entendimento do comportamento tribológico dos materiais envolvidos no contato são fundamentais para o desenvolvimento tecnológico e possível otimização do sistema. Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento do cobre e de duas ligas de latão em aço para encontrar o efeito da diferença de composição química no atrito e desgaste. Estes comportamentos foram obtidos através de testes pino-disco sem adição de lubrificante com pinos de latão 270, latão 260 e cobre com dureza de 200 HV em discos de aço H13 com dureza de 600 HV retificados. Foram estudados os diferentes regimes de desgaste modificando a carga normal aplicada no contato do pino sobre o disco. Os resultados mostraram que os latões sofreram mais desgaste que o cobre, principalmente para altas cargas, e que o coeficiente de atrito do cobre foi maior do que um e muito superior do que os latões.

Abstract

The synchronized ring of a car transmission aims the timing gears and acts in accelerating or decelerating them. For these purposes, the rings are subjected to sliding metal x metal interface with high pressures, so the complete understanding of the tribological behavior of the materials involved in the contact are essential for technological development and possible system optimization. This study investigated the behavior of copper and two brass alloys in steel, to find the effect of the difference in the chemical composition on friction and wear. These behaviors were obtained on pin-disc test without addition of lubricant, with pins of brass 270, brass 260 and copper with a hardness of 200 HV and disks of steel H13 with a hardness of 600 HV rectified. Were analyzed the different regimens of wear modifying the normal load applied to the contact pin on the disk. The results showed that the brass suffers more wear than copper, especially for heavy loads, and that copper's friction coefficient is greater than one and superior than brass.

Lista de Figuras

Figura 1 - Possível economia de dinheiro em diferentes setores. 1: Redução de manutenção; 2: Menos tempo improdutivo; 3: Maior vida das máquinas; 4: Redução de dissipação de energia devido ao atrito; 5: Economia em investimentos; 6: Economia em lubrificantes; 7: Economia em mão-de-obra (Willians, 1994).	2
Figura 2 - Comparação entre as dimensões previstas no projeto com a realidade aceitável para uma peça cilíndrica (SISDELLI, 2006).....	3
Figura 3 - Representação da real área de contato em contraposição da área aparente (Spencer , et al., 2013).....	4
Figura 4 - Força de atrito pelo tempo (Belyi, et al., 1993).	5
Figura 5 - Relação entre o coeficiente de atrito estático com o ângulo de inclinação de um plano (Gupta, et al., 1991).	5
Figura 6 - Relação entre o coeficiente de atrito com a área aparente de contato (Hutchings, 1992).	6
Figura 7 - Três tipos diferentes de comportamento do coeficiente de atrito pela carga normal (Bhushan, 2002).	7
Figura 8 - Relação entre o coeficiente de atrito pela velocidade de escorregamento para dois materiais diferentes (Bhushan, 2002).	8
Figura 9 - Relação entre o volume de desgaste pela distância escorregada de vários materiais diferentes (Bhushan, 2002).	9
Figura 10 - Relação do desgaste em relação à velocidade de deslizamento, a carga normal e a temperatura (Davim, 1999).....	9
Figura 11 - Mecanismo de geração de partículas pelo desgaste por adesão (Gupta, et al., 1991).....	10
Figura 12 - Variação de composição química (esquerda) e variação de dureza (direita) pela distância da superfície atritada teste pino-disco com pinos de latão α/β atritando discos de aço (Hutchings, 1992).....	12
Figura 13 - Compatibilidade entre diferentes metais (Gupta, et al., 1991).	13
Figura 14 - Modelo de ensaio Pin-on-Disk (Hutchings, 1992).	15
Figura 15 - Relação de desgaste brando e severo pela carga normal aplicada em pinos de latão em discos de aço com alta dureza (Hutchings, 1992).....	16

Figura 16 - Micrografia de latão α/β atritado (esquerda) e representação das regiões perto da superfície atritada (direita) quando há a deformação plástica (Hutchings, 1992).	17
Figura 17 - Diagrama de fases Cu-Zn (ASM International, 2004).....	18
Figura 18 - Microestrutura típica de deformação a frio de latão α , com grãos alinhados na direção de deformação, junto com maclas de deformação.	19
Figura 19 - Esquema de um disco utilizado no ensaio Pin-on-Disk.....	20
Figura 20 - Metalografia da condição inicial do disco, nas seções transversal (esquerda) e paralela (direita) com aproximação de 500 vezes e atacado com Nital.....	21
Figura 21 - Tribômetro utilizado nos ensaios pino-disco.....	22
Figura 22 - Perda de massa do pino do latão 270, 260 e do cobre pela carga normal adicionada após a realização dos ensaios pin-on-disk.....	24
Figura 23 - Variação de massa dos discos atritados pelos pinos do latão 270, 260 e do cobre, pela carga normal aplicada após os ensaios pino sobre disco.	25
Figura 24 - Força de atrito pelo tempo dos ensaios pino sobre disco realizados o latão 270 (esquerda), o latão 260 (centro) e o cobre(esquerda).	26
Figura 25 - Coeficiente de atrito pela carga normal aplicada no ensaio do latão 270 (esquerda), do latão 260 (centro) e do cobre (direita).	27
Figura 26 - Gráfico 3D da força de atrito e carga normal aplicada, pelo tempo, dos latões 270, 260 e do cobre intercaladas.	28
Figura 27 - Comparação dos comportamentos do coeficiente de atrito pela carga normal aplicada de todas as composições.....	29
Figura 28 - Superfície atritada dos pinos de latão 270 nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais fora: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 60N (d); 90N (e); 100N (f); 125N (g).	30
Figura 29 - Superfície atritada dos pinos de latão 260 nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais fora: 10N (a); 25N (b); 40N (c); 50N (d); 60N (e); 75N (f); 100N (g); 125N (h); 140N(i).....	31
Figura 30 - Superfície atritada dos pinos de cobre nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais fora: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 75N (d); 100N (e); 140N (f).....	32
Figura 31 - Tribofilme impresso nos discos atritados com os pinos de latão 270 com diferentes cargas normais com ampliação de 10 vezes. As cargas normais correspondentes são: 10N (a); 75N (b); 100N (c); 125N (d).....	32

Figura 32 - Tribofilme impresso nos discos atritados com os pinos de latão 260 com diferentes cargas normais com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais correspondentes são: 40N (a); 50N (b).....	33
Figura 33 - Tribofilme impresso nos discos atritados com pinos de cobre com diferentes cargas normais com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais correspondentes são: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 125N (d).	33
Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino latão 270 atritado com carga normal de 60 Newtons.	34
Figura 35 - Resultado do EDS realizado na mancha escura da superfície do pino de latão 270 atritado com 60 Newtons.	35
Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 270 atritado com carga normal de 75 Newtons.	35
Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 260 atritado com carga normal de 40 Newtons.	36
Figura 38 - Resultado do EDS realizado na mancha escura da superfície do pino de latão 260 atritado com 40 Newtons.	36
Figura 39 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 260 atritado com carga normal de 140 Newtons.	37
Figura 40 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de cobre atritado com carga normal de 25 Newtons.	37
Figura 41 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do pino de cobre atritado com 25 Newtons.	38
Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 270 com carga normal de 10 Newtons.	38
Figura 43 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 270 com 10 Newtons.	39
Figura 44 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 270 com carga normal de 100 Newtons.	39
Figura 45 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 270 com 100 Newtons.	40
Figura 46 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 260 com carga normal de 25 Newtons.	41
Figura 47 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 260 com 25 Newtons.	41

Figura 48 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 260 com carga normal de 100 Newtons.....	42
Figura 49 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 260 com 100 Newtons.....	42
Figura 50 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de cobre com carga normal de 10 Newtons.....	43
Figura 51 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de cobre com 10 Newtons.	43
Figura 52 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de cobre com carga normal de 50 Newtons.....	44
Figura 53 – Microscopia óptica da secção transversal da metade de um pino do latão 270 atritado com carga normal de 25 Newtons (a), 50 Newtons (b), 60 Newtons (c) com 500 vezes de aumento e com 100 Newtons (d) com 1000 vezes de aumento.....	45
Figura 54 - Microscopia óptica da secção transversal da metade de um pino do latão 260 atritado com carga normal de 40 Newtons (a), 60 Newtons (b), 75 Newtons (c) e 100 Newtons (d) com 500 vezes de aumento.....	46
Figura 55 - Microscopia óptica da secção transversal da metade dos pinos de cobre atritado com carga normal de 25 Newtons(a), 50 Newtons (b), 100 Newtons (c) e 125 Newtons (d) com 500 vezes de aumento.	47
Figura 56 - Coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal do latão 270 e do latão 260.	51
Figura 57 - Coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal do cobre.	53

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Relação entre a compatibilidade dos metais com a capacidade de deslizamento e o desgaste (Gupta, et al., 1991).....	14
Tabela 2 - Coeficiente de desgaste k ($\times 10^{-4}$) em comparação com diferentes solubilidades (Gupta, et al., 1991).....	14
Tabela 3 - Composição química nominal dos pinos e discos utilizados na realização dos ensaios Pin-on-Disk.....	20
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios pino-disco.	21
Tabela 5 - Tempo de estabilização da força de atrito pela carga normal.	26
Tabela 6 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de latão 270 pela carga normal aplicada.	49
Tabela 7 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de latão 260 pela carga normal aplicada.	50
Tabela 8 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de cobre pela carga normal aplicada. ..	52

Sumário

1. Objetivo.....	1
2. Introdução.....	1
3. Revisão Bibliográfica.....	1
3.1 Tribologia.....	1
3.1.1 Superfícies dos sólidos	2
3.1.2 Quantificação e topografia da superfície.....	3
3.1.4 Contato entre superfícies.....	3
3.2 Atrito.....	4
3.2.1 Definição	4
3.2.2 Leis e teorias do atrito	4
3.2.3 Atrito de deslizamento	6
3.2.4 Influência da carga normal no atrito	7
3.2.5 Influência da velocidade no atrito	7
3.3 Desgaste.....	8
3.3.1 Definição	8
3.3.2 Influência da temperatura, da velocidade e da carga normal no desgaste.....	9
3.3.3 Tipos de desgaste	10
3.3.3.1 Desgaste por adesão	10
3.3.3.2 Desgaste oxidativo	11
3.3.4 Efeito da microestrutura no atrito e no desgaste	12
3.3.5 Efeito da microestrutura no atrito.....	12
3.3.6 Efeito da microestrutura no desgaste	14
3.4 Métodos de ensaios.....	14
3.4.1 Pino-disco	15
3.5 Desgaste típico de latão	15

3.6	Latão	17
4.	Materiais e métodos	20
5.	Resultados	24
5.1	Variação de massa	24
5.1.1	Variação de massa dos pinos	24
5.1.2	Variação de massa dos discos.....	25
5.2	Força e coeficiente de atrito	26
5.3	Análise óptica (lupa)	30
5.3.1	Superfície dos pinos	30
5.3.2	Superfície dos discos	32
5.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	34
5.4.1	MEV da superfície dos pinos	34
5.4.2	MEV da superfície dos discos	38
5.5	Metalografia.....	45
5.5.1	Metalografia dos pinos de latão 270.....	45
5.5.2	Metalografia dos pinos de latão 260.....	46
5.5.3	Metalografia dos pinos de cobre.....	47
6.	Discussão.....	49
7.	Conclusão	55
8.	Bibliografia.....	57
	Anexo I	58
	Anexo II.....	59
	Anexo III	60

1. Objetivo

Obter o comportamento característico de desgaste e da força de atrito pelo tempo de várias composições de latão no ensaio pino-disco e analisar o efeito dos tipos de desgaste apresentados. Realizar análise metalográfica para a identificação das fases formadas após o ensaio e do comportamento dos grãos em um corte transversal ao atrito.

2. Introdução

Os anéis sincronizados de transmissão de automóveis são responsáveis por dar maior comodidade nas trocas de marcha, ajustando a velocidade das engrenagens para a devida alocação. Com eles é possível não depender de força e habilidade para encontrar a rotação adequada para essa troca, além de deixar de correr risco de ter impacto entre os dentes das engrenagens.

Esses anéis, que são de latão, trabalham diretamente em contato com o metal da engrenagem, que é composto de aço, tendo que fornecer atrito suficiente para acelerar ou desacelerar as engrenagens e resistir ao desgaste devido às fortes pressões imbuídas (Sena, 2008).

É de vital importância o completo entendimento do comportamento do atrito e do desgaste das ligas envolvidas, principalmente variando as cargas aplicadas, para futuros avanços tecnológicos e possível otimização do sistema.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Tribologia

Tribologia vem da palavra grega TRIBOS que significa atrito e é definida como a ciência e tecnologia de interação de superfícies em movimento de contato. Cientistas e engenheiros tem vital interesse nesse tema para planejar ou operar algum maquinário.

Estima-se que cerca de um terço da energia consumida no mundo seja devido à dissipação que ocorre na fricção, portanto utilizar um sistema tribológico adequado maximizando a efetividade pode resultar na economia de energia e na diminuição da emissão de resíduos. Willians (1994) afirma que os efeitos tribológicos têm potencial de economizar aproximadamente 500 milhões de libras esterlinas por ano (Figura 1), calculado em 1969, reduzindo a manutenção, tempos mortos inativos no trabalho, aumentando a vida das máquinas, entre outros fatores.

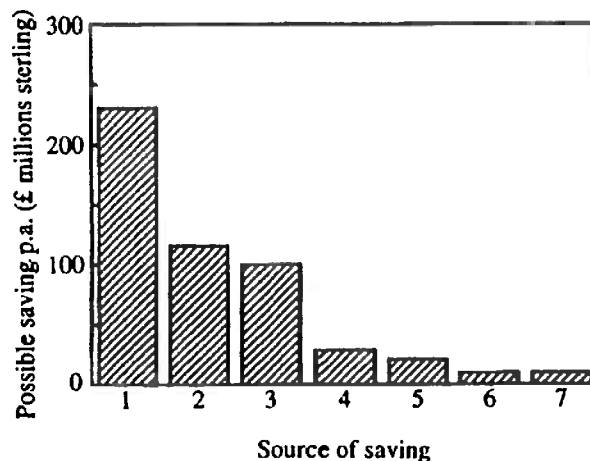


Figura 1 - Possível economia de dinheiro em diferentes setores. 1: Redução de manutenção; 2: Menos tempo improdutivo; 3: Maior vida das máquinas; 4: Redução de dissipação de energia devido ao atrito; 5: Economia em investimentos; 6: Economia em lubrificantes; 7: Economia em mão-de-obra (Willians, 1994).

Existem algumas exceções a estes fatores como o planejamento de freios, discos de tração e de fricção onde a força de atrito é extremamente importante. Não obstante é sempre desejável a diminuição da perda por desgaste.

Na tribologia, existem três grandes áreas de estudo: atrito, desgaste e lubrificação, tendo também três fatores principais que alteram essas propriedades: temperatura, carga normal e velocidade de escorregamento (Stachowiak, et al., 2005).

3.1.1 Superfícies dos sólidos

As superfícies dos sólidos apresentam formas complexas que tornam muito simplistas as aproximações comparadas com geometrias conhecidas, como esferas e planos. Apresentam distorções, defeitos e imperfeições que afetam as reações químicas, o coeficiente de atrito, de desgaste e características de deformação.

Existem dois tipos de características que influenciam fortemente o atrito e o desgaste:

- Defeitos em escala atômica em uma superfície relativamente plana que afeta o efeito da lubrificação.
- A rugosidade da superfície que afeta o contato entre os sólidos, alterando a área de contato real.

3.1.2 Quantificação e topografia da superfície

Não importa quão perfeitamente uma superfície é trabalhada, pois sempre ocorrerá certa rugosidade, mesmo que seja mínima (Figura 2). A superfície formada pode ser denominada de topografia.

A rugosidade é de alta importância na tribologia devido ao contato entre as superfícies, ocasionando atrito e conseqüentemente o desgaste.

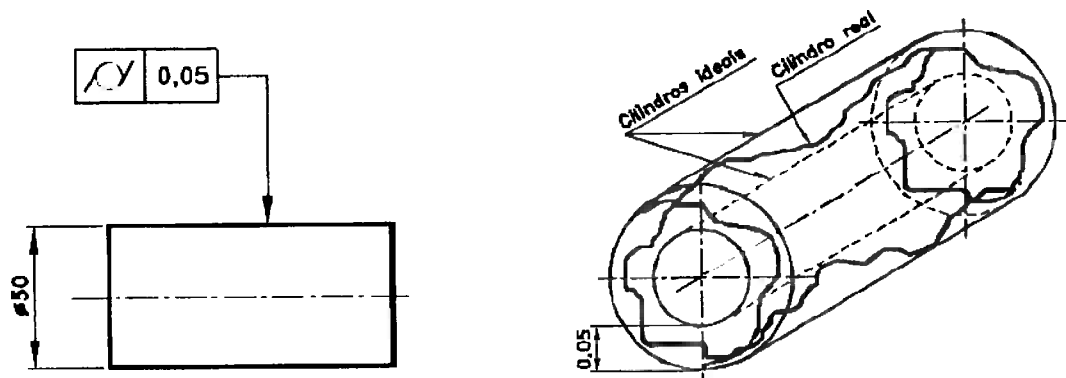


Figura 2 - Comparação entre as dimensões previstas no projeto com a realidade aceitável para uma peça cilíndrica (SISDELLI, 2006).

3.1.4 Contato entre superfícies

O contato real entre as superfícies de dois corpos é muito menor do que o contato aparente (Figura 3). Como existe pouca área efetivamente em contato, são gerados pontos com alta densidade de pressão onde são estabelecidas as cargas entre os dois corpos. As pressões podem ser tão altas que geram pequenas deformações localizadas nas microrregiões de contato.

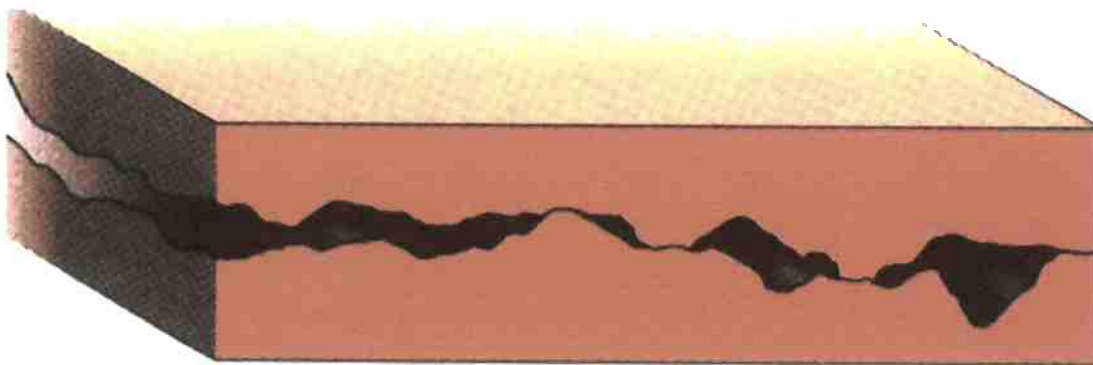


Figura 3 - Representação da real área de contato em contraposição da área aparente (Spencer , et al., 2013).

Não obstante, algumas teorias sugerem que a real área de contato é o produto da deformação plástica entre a rugosidade dos dois corpos, porém foi descoberto que a maior parte da deformação das rugosidades é de natureza elástica.

A relação entre a área de contato real e aparente é de crucial interesse para descobrir o comportamento do atrito e do desgaste (Stachowiak, et al., 2005).

3.2 Atrito

3.2.1 Definição

Atrito é uma força tangencial com a mesma direção e sentido oposto à tendência de movimento. Ocorre atrito quando dois corpos sólidos têm alguma experiência de interação de contato, como escorregamento ou rolamento. Para ocorrer o atrito, é necessário pelo menos dois graus de liberdade, onde um é a carga normal aplicada no contato dos corpos e uma tendência de escorregamento, ou escorregamento aplicado (Bhushan, 2002).

3.2.2 Leis e teorias do atrito

Existem dois tipos de atrito, o atrito estático e o atrito cinético, onde o módulo da força do estático é sempre maior do que do cinético, conforme é observado na Figura 4. O atrito estático é a força de reação contrária e ocorre sempre com a mesma intensidade à força aplicada. Existe um limite de força de atrito estático e quando este limite é alcançado e ultrapassado, os corpos começam a se movimentar e é quando a força de atrito dinâmico entra em ação.

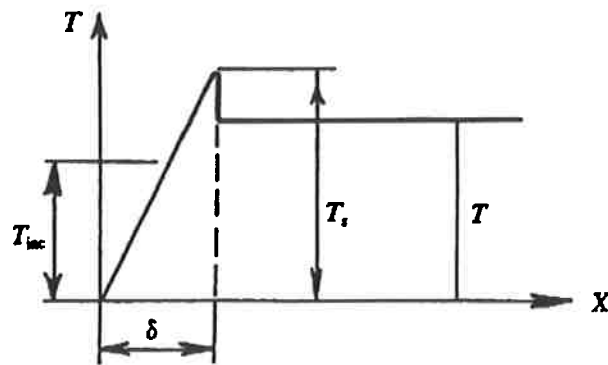


Figura 4 - Força de atrito pelo tempo (Belyi, et al., 1993).

O atrito geralmente obedece a duas leis básicas, conhecidas como as leis de Amontons (Equação I e II), descobertas pelo físico francês Guillaume Amontons em 1699. Não obstante Leonardo da Vinci tinha publicado essas mesmas leis quase 200 anos antes.

$$F = \mu W \quad (\text{Equação I})$$

Na qual μ é o coeficiente de atrito dinâmico e W é a carga normal aplicada.

$$\mu_s = \tan \theta \quad (\text{Equação II})$$

Na qual μ_s é o coeficiente de atrito estático e θ é a inclinação máxima que qualquer corpo permaneça parado em plano inclinado, conforme descrito na Figura 5.

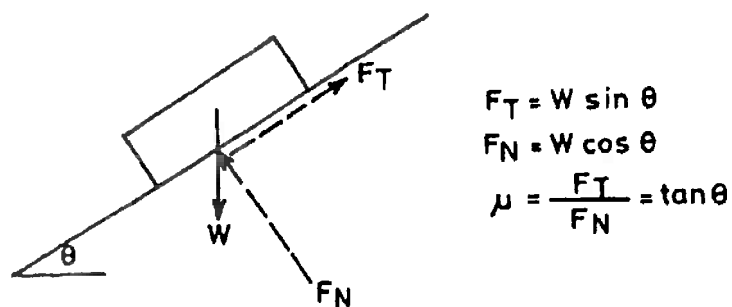


Figura 5 - Relação entre o coeficiente de atrito estático com o ângulo de inclinação de um plano (Gupta, et al., 1991).

Segundo estas leis, o coeficiente de atrito estático é independente da área e de sua geometria de contato (Figura 6). Além disso, Coulomb (1785) postulou que a força de atrito independe da velocidade de escorregamento (Bhushan, 2002).

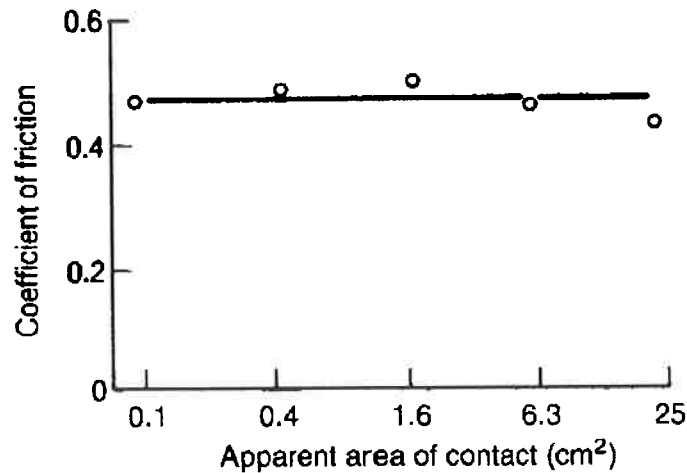


Figura 6 - Relação entre o coeficiente de atrito com a área aparente de contato (Hutchings, 1992).

3.2.3 Atrito de deslizamento

Como o atrito é uma força dissipativa, em 1950 foi proposta uma teoria segundo a qual os materiais em contato apresentam adesão em microescala da sua área real de contato. Esta energia causa deformação elástica e plástica em microescala, podendo também ocorrer em macroescala (dependendo das condições).

O mecanismo dominante de dissipação de energia em metais é a deformação plástica, onde cerca de 0,1 a 10% da energia é perdida através de deformação elástica.

Se considerarmos esta teoria, é possível adotar que a força de atrito é igual à força necessária para separar a superfície aderida, mais a força de deformação plástica (Equação III).

$$F = F_a + F_d \quad (\text{Equação III})$$

Gerando a equação IV:

$$\mu = \mu_a + \mu_d \quad (\text{Equação IV})$$

Essa adesão é a força interfacial interatômica que depende da interpenetração das asperezas e da composição da superfície.

Em 1978 o componente de atrito pela adesão foi calculado a partir da análise de mecânica da fratura e é descrita na equação V.

$$\mu_a = C \frac{\sigma_{12} \delta_c}{N^2 (F_N H)^{1/2}} \quad (\text{Equação V})$$

Na qual C é uma constante, σ_{12} é a resistência á tração interfacial, δ_c é o fator critico de abertura de trinca e N é o fator de encruamento.

Quando duas superfícies ásperas escorregam entre si, deformação plástica deve ocorrer, ocorrendo também perda de energia (Rabinowicz, 1965).

3.2.4 Influência da carga normal no atrito

O coeficiente de atrito depende fortemente da combinação de materiais em contato, podendo variar significativamente com a carga normal imposta (Figura 7).

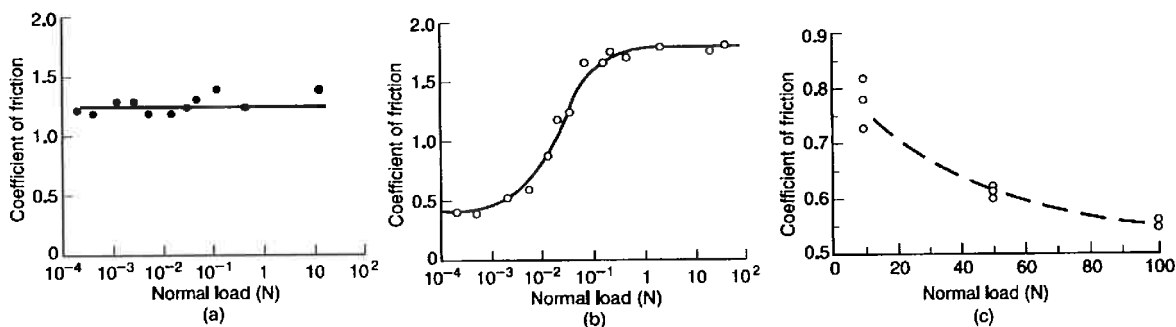


Figura 7 - Três tipos diferentes de comportamento do coeficiente de atrito pela carga normal (Bhushan, 2002).

Dependendo dos materiais em contato é possível observar pelo menos três comportamentos distintos. O coeficiente de atrito dinâmico pode tanto ficar constante (a), aumentar em formato de S (b) e diminuir sua intensidade (c) conforme é aumentada a carga normal (Bhushan, 2002).

3.2.5 Influência da velocidade no atrito

Ao contrario do que Coulomb postulou em 1785, o coeficiente de atrito tende a diminuir, aumentando a velocidade de deslizamento, conforme é possível perceber na Figura 8.

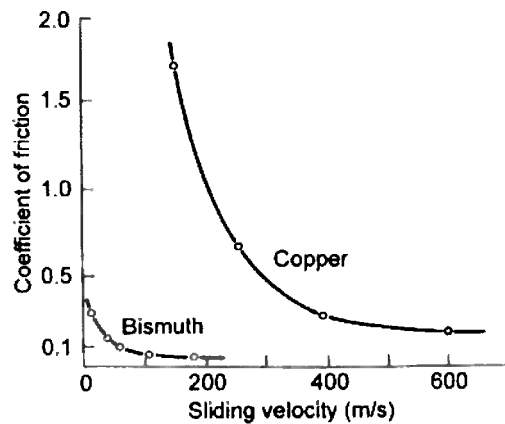


Figura 8 - Relação entre o coeficiente de atrito pela velocidade de escorregamento para dois materiais diferentes (Bhushan, 2002).

Esta curva foi criada por Rabinowitz (1995) com cobre deslizando em cobre com carga normal de 3N.

Não obstante, a variação é pouco significativa. Geralmente, ao aumentar a velocidade, o calor gerado pelo atrito pode acarretar altas diferenças no coeficiente (Gupta, et al., 1991).

3.3 Desgaste

3.3.1 Definição

Desgaste é a remoção de material de um ou mais corpos que foram submetidos a interação por contato, na qual as partículas desprendidas de um material são chamadas de Debris. Ocorre quando as superfícies sólidas interagem entre si gerando atrito, e consequentemente o desgaste.

O desgaste ocorre linearmente dependente da distância escorregada, conforme é possível observar na Figura 9 (Bhushan, 2002).

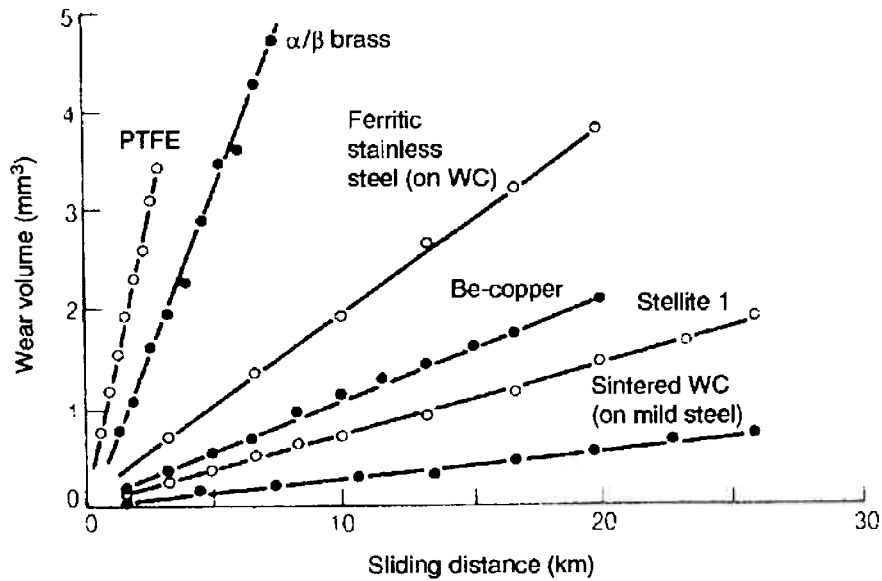


Figura 9 - Relação entre o volume de desgaste pela distância escorregada de varios materiais diferentes (Bhushan, 2002).

3.3.2 Influência da temperatura, da velocidade e da carga normal no desgaste.

Em 1999, Davim realizou uma série de experimentos com testes pino sobre disco de latão 70/30 em discos de aço e determinou a relação do desgaste pela velocidade, à carga normal e a temperatura (Figura 10).

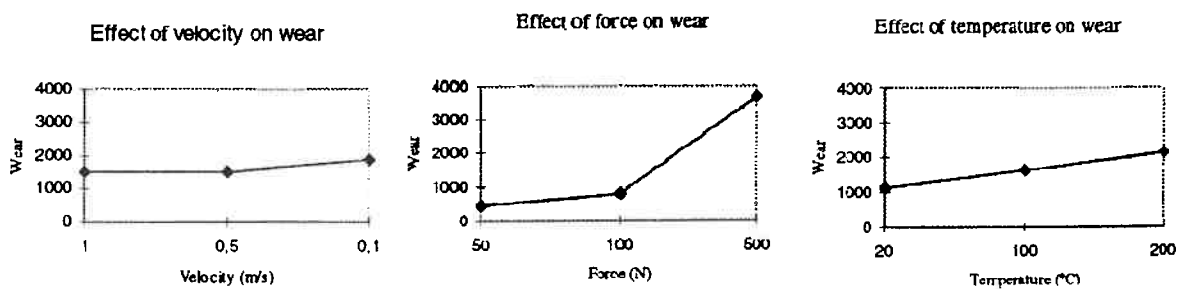


Figura 10 - Relação do desgaste em relação à velocidade de deslizamento, a carga normal e a temperatura (Davim, 1999).

É possível observar que o desgaste é diretamente proporcional ao aumento de temperatura e pouco alterado com aumento da velocidade de deslizamento. O desgaste varia pouco conforme o aumento da carga normal, porém aumenta muito ao passar uma carga normal crítica, no caso de 100N (Davim, 1999).

3.3.3 Tipos de desgaste

Existem diferentes tipos de desgaste dependendo do regime, das condições de contorno e de outros aspectos, como a interação, configuração cristalográfica e solubilidade entre os materiais em contato, entre outros (Gupta, et al., 1991).

3.3.3.1 Desgaste por adesão

Ocorre quando é formada uma adesão em escala atômica entre os dois sólidos em contato. O mecanismo de desgaste por adesão pode ser observado na figura 11, onde está representado um esquema de formação de partículas de desgaste.



Figura 11 - Mecanismo de geração de partículas pelo desgaste por adesão (Gupta, et al., 1991).

Existem cinco mecanismos de desgaste por adesão dependendo da condutividade elétrica dos corpos, onde fortes ligações são criadas quando um objeto se comporta como doador de elétrons e o outro como receptor.

Também está diretamente relacionado com a compatibilidade metalúrgica de formar soluções sólidas ou intermetálicas. Quanto maior o grau de solubilidade entre os metais em contato, maior a tendência de atração dos átomos de contato.

A estrutura cristalina influencia o desgaste por adesão, devido à aspereza formada pelo contato de deformação e pela quantidade de planos de escorregamento. Geralmente estruturas hexagonais se mostram com menor tendência de desgastes por adesão se comparado com o cubico de faces centradas (CFC), ou o cubico de corpo centrado (CCC).

Não obstante, quando dois metais diferentes entram em contato, o desgaste por adesão transfere partículas do corpo menos duro para o corpo em contato com maior dureza.

O comportamento de desgaste por adesão foi descrito pela equação de Archard (Equação VI).

$$W_{ad} = \frac{V}{L} = K \frac{F_N}{H} \quad (\text{Equação VI})$$

Na qual W é a taxa de desgaste por adesão (volume pela unidade de distância), K é o coeficiente de desgaste, V é o volume de desgaste, L é a distância escorregada, F_N é a carga normal aplicada e H é a dureza do material menos duro.

Esta equação sugere que o desgaste é diretamente proporcional à carga normal aplicada, além de ser implicitamente proporcional a área real de contato (Bhushan, 2002).

O coeficiente de desgaste (K) depende de muitas variáveis e propriedades do material. Porém, ao que deslizar dois metais iguais, o coeficiente de desgaste é maior do que se forem diferentes.

Ocorrendo o desgaste por adesão, o material mais mole adere na superfície do material mais duro, formando um filme denominado tribofilme. Estes filmes são criados geralmente quando há alta deformação do material mais mole (Bayer, 1994).

3.3.3.2 Desgaste oxidativo

Comumente chamado de mecanismo de desgaste por reação triboquímica ou de oxidação, se caracteriza pela constante criação de camadas de óxidos na superfície atritada. Esta camada fina é rompida pela força de carregamento, gerando, normalmente, um fino pó de debri de coloração preta.

Este mecanismo é favorecido com o aumento da temperatura e da umidade relativa do ar. Se o atrito ocorrer no vácuo, este mecanismo não ocorre. Além disso, a camada fina de óxido é frágil e tende a ser quebrada dependendo da forma de carregamento imbuída.

A Figura 12 mostra a composição química típica de um teste pino-disco com pinos de latão α/β atritando discos de aço.

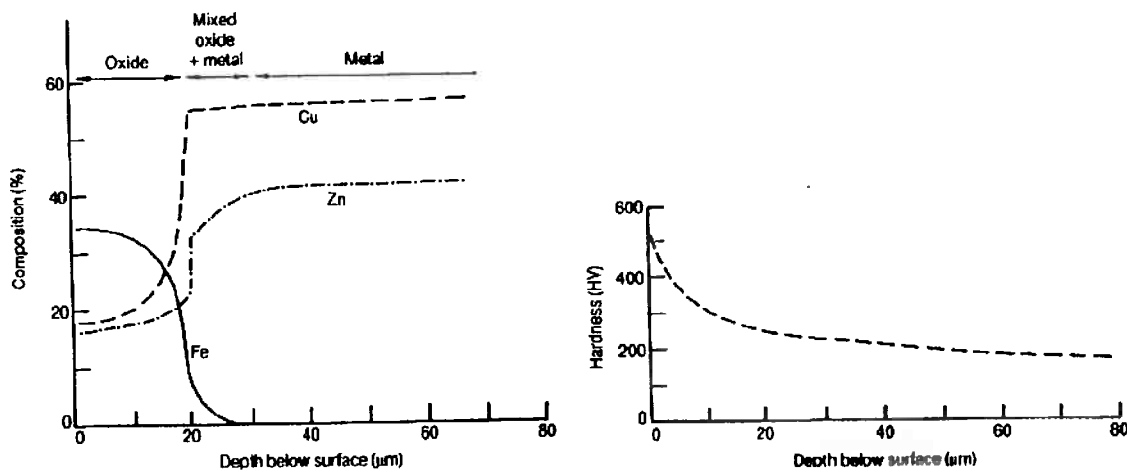


Figura 12 - Variação de composição química (esquerda) e variação de dureza (direita) pela distância da superfície atritada teste pino-disco com pinos de latão α/β atritando discos de aço (Hutchings, 1992).

É possível notar que existe anisotropia de dureza que varia conforme a distância da superfície atritada.

3.3.4 Efeito da microestrutura no atrito e no desgaste

A microestrutura dos materiais é de vital importância para as suas propriedades tribológicas. O módulo elástico, a dureza, a tenacidade e as propriedades químicas afetam o atrito e o desgaste. Diferentes fases e poros podem ser geradores de trincas e caminhos de propagação, influenciando diretamente o grau de desgaste.

Como o atrito e o desgaste dependem de contato entre dois corpos, a microestrutura inicial é alterada durante o deslizamento. É normal ocorrer gradiente de microestrutura na superfície, além de migração de solutos microestruturais por difusão (Gupta, et al., 1991).

3.3.5 Efeito da microestrutura no atrito

Em 1971, Rabinowicz concluiu que o efeito da microestrutura no coeficiente de atrito era pelo coeficiente de adesão dos materiais (W_{12}) e pela sua dureza, sendo possível reescrever a equação VII com base nestes dois parâmetros, formando a equação VII.

$$\mu_a \sim 0,3 + C_1 \frac{W_{12}}{H} \quad (\text{Equação VII})$$

Na qual C_1 é a constante de geometria.

Como o máximo valor de W_{12} é $(\gamma_1 + \gamma_2)$ e o mínimo é zero, foi conveniente adotar a equação VIII.

$$W_{12} = C_2(\gamma_1 + \gamma_2) \quad (\text{Equação VIII})$$

Substituindo as equações XIV e XV, gera a equação IX.

$$\mu_a \sim 0,3 + C_1 \frac{C_2(\gamma_1 + \gamma_2)}{H} \quad (\text{Equação IX})$$

Na qual C_2 é conhecido como parâmetro de compatibilidade. Depende da compatibilidade entre os diferentes materiais, que está descrita na Figura 13.

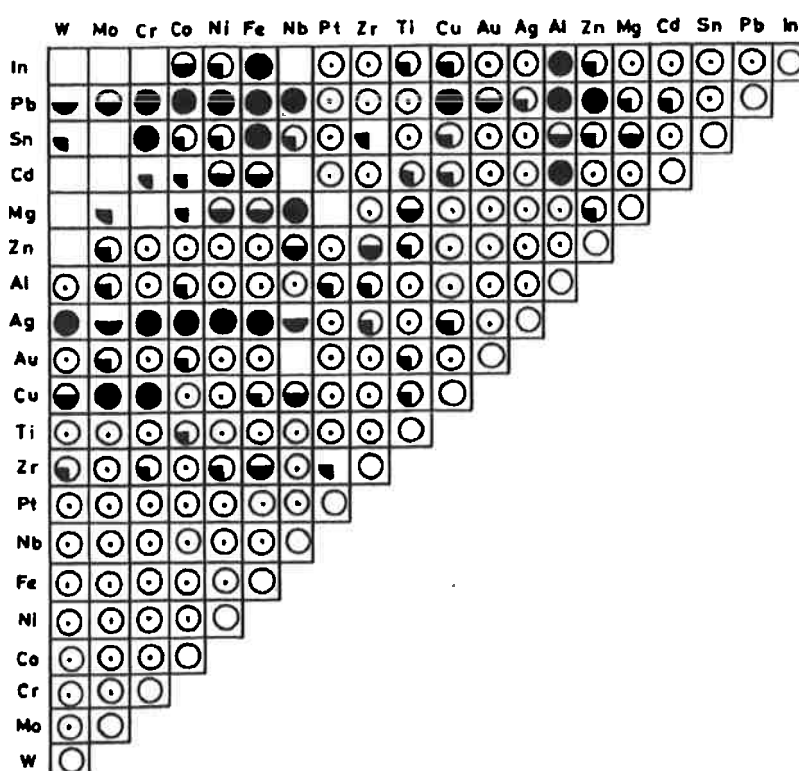


Figura 13 - Compatibilidade entre diferentes metais (Gupta, et al., 1991).

Os resultados da Figura 13 foram obtidos de experimentos de Rabinowicz e seus colegas entre o período de 1971 a 1980. Foi constatado que os metais de configuração cristalográfica CCC e CFC obedeciam bem a equação XVI, porém os metais de configuração HC apresentavam comportamentos diferentes (Gupta, et al., 1991).

3.3.6 Efeito da microestrutura no desgaste

O desgaste por adesão está diretamente relacionado com relação de compatibilidade entre os metais. A relação entre a compatibilidade com o desgaste está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 - Relação entre a compatibilidade dos metais com a capacidade de deslizamento e o desgaste (Gupta, et al., 1991).

Condição	Compatibilidade	Solubilidade metalúrgica	Capacidade de deslizamento	Desgaste
Idêntico		100%	Muito ruim	Muito alta
Compatível		Acima de 1%	Ruim	Alta
Limitada		Entre 0,1 e 1%	Intermediário	Intermediário
Muito limitada		Abaixo de 0,1%	Boa	Baixa
Incompatível		Não se misturam	Muito boa	Muito baixa

A compatibilidade metalúrgica representa o grau de atração entre os átomos de contato (Gupta, et al., 1991). Quanto maior a compatibilidade entre os metais, maior será o seu desgaste, conforme é possível observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficiente de desgaste k ($\times 10^{-4}$) em comparação com diferentes solubilidades (Gupta, et al., 1991).

Par metálico	Solubilidade	Coeficiente de desgaste k ($\times 10^{-4}$)
Fe-Ag	Não	0,68
Fe-Pb	Não	0,69
Al-Fe	Sim	1
Fe-Cu	Sim	19
Al-Al	Sim	30
Fe-Fe	Sim	77

3.4 Métodos de ensaios

Em 1976, o STLE (Society of Tribologists and Lubrication Engineers) divulgou uma lista dos vários dispositivos disponíveis para determinar fenômenos de superfície (atrito, desgaste e lubrificação):

- Esfera múltipla (multiple Sphere)
- Cilindros cruzados (Crossed Cylinders)
- Pino-em-Plano (Pin-on-Flat)
- Plano-em-Plano (Flat-on-Flat)
- Pino-disco (Pin-on-Disk)
- Cilindro em cilindro (Cylinder on Cylinder)
- Pino em cilindro girando (Pin-on-rotating cylinder)
- Plano retangular em cilindro girando (Rectangular Flat on rotating cylinder)
- Disco em disco (Disk-on-Disk)

Cada um destes equipamentos é específico para determinar algum parâmetro e/ou em alguma situação específica (Blau, 1995).

3.4.1 Pino-disco

O ensaio pino-disco é composto por um pino carregado com uma carga normal pressionando um disco que é rotacionado, gerando atrito (Figura 14). São comumente usados na indústria automobilística.

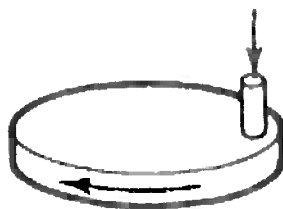


Figura 14 - Modelo de ensaio pino-disco (Hutchings, 1992).

Este ensaio é o mais utilizado para determinar o comportamento de atrito e desgaste do par de materiais desejados. É possível obter vários pinos de mesmo diâmetro e submetê-los a muitos testes (Blau, 1995).

3.5 Desgaste típico de latão

Muitos dos comportamentos de ensaios de deslizamentos a seco entre metais podem ser analisados a partir de ensaios Pin-on-Disk entre latão e aço. A Figura 15 demonstra um experimento realizado com pinos de latão (59% Cu; 39% Zn; 2% Pb) contra disco de aço com alta dureza.

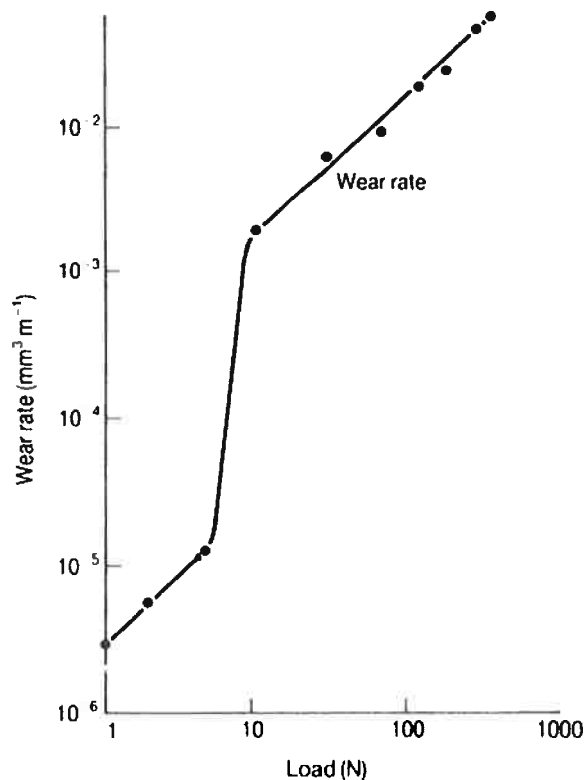


Figura 15 - Relação de desgaste brando e severo pela carga normal aplicada em pinos de latão em discos de aço com alta dureza (Hutchings, 1992).

É possível observar que existem três fases de desgaste, o desgaste brando, o severo e o intermediário. O regime de desgaste obedece bem a equação de Archard (Equação IX), variando apenas o coeficiente de desgaste (k) dependendo de seu regime.

- O desgaste brando é composto pela primeira etapa da reta de desgaste, possui coeficiente de desgaste de aproximadamente $2 \cdot 10^{-6}$, as partículas de desgaste (Debris) tem coloração preta e possuem entre $0,01 \mu\text{m}$ a $1 \mu\text{m}$ de tamanho.
- O desgaste severo é composto pela terceira etapa da reta de desgaste (aproximadamente 10N), possui coeficiente de desgaste de aproximadamente 10^{-4} , seus debris são da coloração do latão e possuem entre $20 \mu\text{m}$ a $200 \mu\text{m}$ de tamanho, podendo ser vistos a olho nu.
- A região de desgaste intermediária é a região de transição entre o desgaste brando e o severo e é resultante da mudança da natureza do contato de deslizamento.

No regime brando, há a formação de filme de oxido na superfície do latão, gerando debris pequenos. No regime severo, os debris tendem a ser em formato de lascas planas (discos) resultante da adesão do latão no aço, desprendendo-se do metal matriz. No regime intermediário há uma competição entre estes dois mecanismos (Hutchings, 1992).

No regime severo, normalmente há regiões de alta deformação plástica como mostra a micrografia e o esquema de deformação da Figura 16.

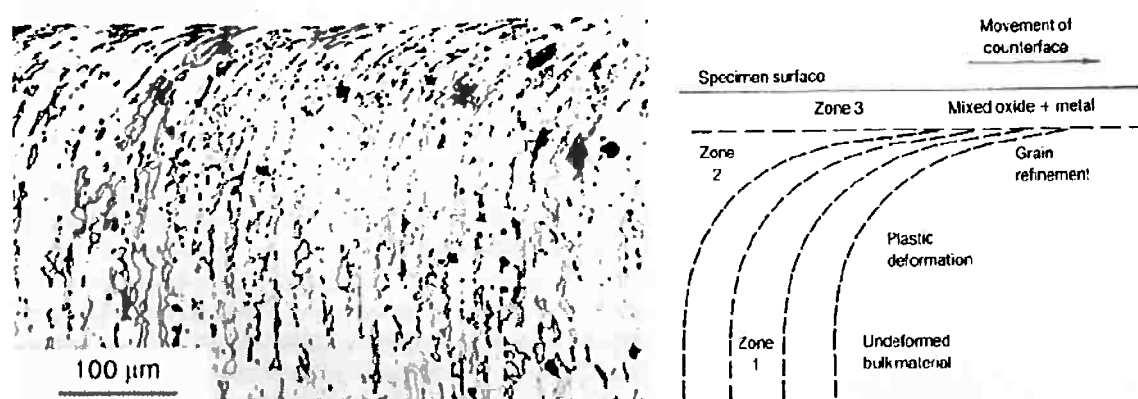


Figura 16 - Micrografia de latão α/β atritado (esquerda) e representação das regiões perto da superfície atritada (direita) quando há a deformação plástica (Hutchings, 1992).

Existem 3 zonas de comportamentos distintos:

- Na zona 1 não há deformação plástica, somente a microestrutura original antes de ser submetido ao ensaio.
- Na zona 2 há a região realmente deformada, aumentado conforme mais perto da superfície.
- A zona 3 possui quase que a mesma região deformada da zona 2, porém com grão refinado e possivelmente não orientado. Esta zona pode conter óxidos ou metal de interface, cujo mecanismo de incorporação dos elementos se assemelha à incorporação de elementos liga por via de deformação mecânica.

3.6 Latão

O latão é uma liga de cobre zinco, na qual o efeito do zinco está descrito no diagrama de fases da Figura 17.

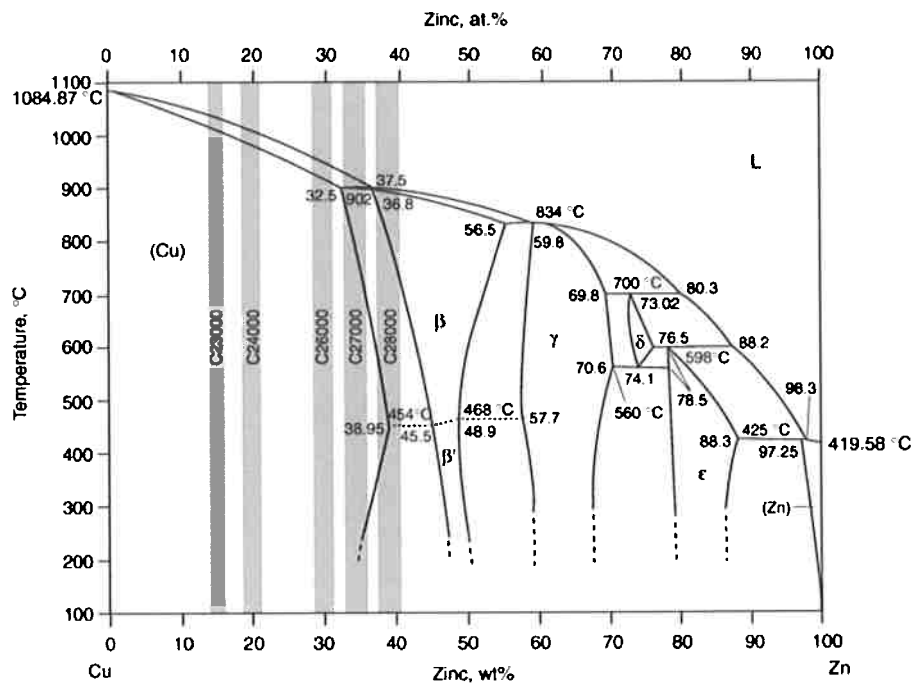


Figura 17 - Diagrama de fases Cu-Zn (ASM International, 2004).

São ligas tipicamente peritéticas e apresentam grandes variedades de composição, porém iremos nos concentrar nas ligas C26000 e C27000 que foram utilizadas nos ensaios.

Na Figura 17 estão descritas as faixas de composição das ligas utilizadas, porém a liga C27000 cai no limiar da transformação α/β .

A região α , representada no gráfico como Cu, representa a fase CFC que possui grande facilidade de criação de maclas. Apesar da liga C27000 passar pela transformação peritética, onde há a criação de β à custa da dissolução de α com o líquido, porém na temperatura ambiente somente a fase α é estável (ASM International, 2004).

Ao deformar a frio um latão α , os grãos tendem a se alinhar na direção de deformação, conforme mostra a Figura 18.

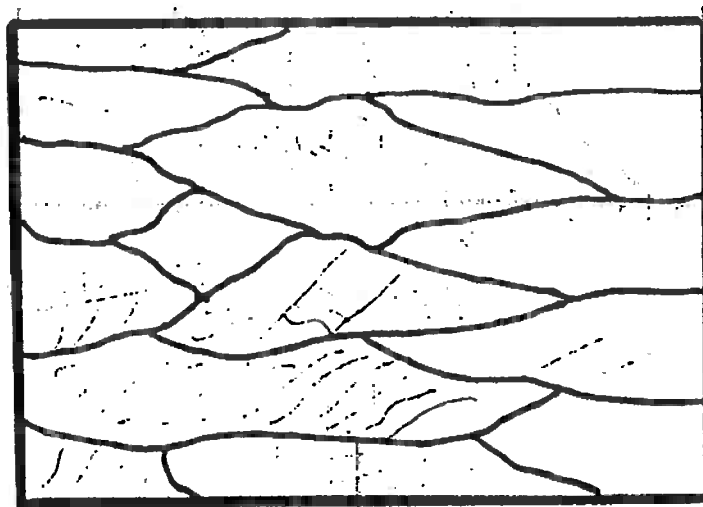


Figura 18 - Microestrutura típica de deformação a frio de latão α , com grãos alinhados na direção de deformação, junto com maclas de deformação.

Apesar de a imagem estar degradada, é possível observar que apesar do alinhamento dos grãos, há a presença de maclas de deformação que se alinham com aproximadamente 45° da direção principal de deformação.

4. Materiais e métodos

Os pinos utilizados continham a mesma dureza média de 200HV, variando somente a composição química. Possuíam 5mm de diâmetro, 20mm de altura e foram obtidos através de trefilação para obter a dureza esperada. Como foram analisados cobre eletrolítico comercialmente puro e dois tipos de latões, onde a composição química está descrita na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química nominal dos pinos e discos utilizados na realização dos ensaios Pin-on-Disk.

Pino		Cu	Zn	Pb	Fe	Sn	Ni
Latão 270		64,1300	35,8103	0,0105	0,0218	0,0260	0,0014
Latão 260		70,5100	29,4281	0,0038	0,0303	0,0265	0,0013
Cobre		99,98	-	-	-	-	-
Disco	Fe	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
AISI H13	90,9	0,4	0,4	1,0	5,0	1,3	1,0

Os discos utilizados eram de aço AISI H13, com composição química descrita na Tabela 3. Possuíam dureza de aproximadamente 590HV, diâmetro externo de 6,5cm, diâmetro interno de 7mm e espessura de 5mm (Figura 19)

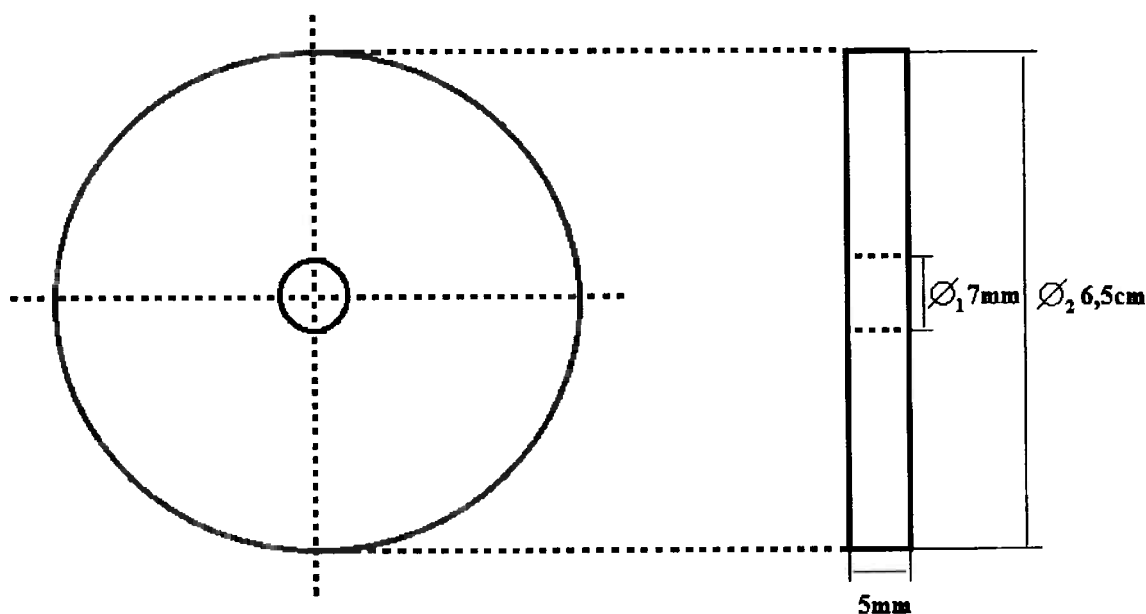


Figura 19 - Esquema de um disco utilizado no ensaio pino-disco.

A Figura 20 mostra a metalografia da condição inicial do disco, nas seções transversal (esquerda) e paralela (direita).



Figura 20 - Metalografia da condição inicial do disco, nas seções transversal (esquerda) e paralela (direita) com aproximação de 500 vezes e atacado com Nital.

É possível observar que se trata de aço com microestrutura martensítica com pequenas esferas pretas (possivelmente carbonetos) homogeneamente distribuídas.

Foram estabelecidos alguns parâmetros fixos para melhor análise dos dados, como: velocidade constante de 40 RPM (rotações por minuto), tempo de 15 minutos (900 segundos) e sem a adição de lubrificantes. Como o pino estava situado a 2,5cm do centro do disco, sua velocidade constante foi de aproximadamente 0,1 metros por segundo, percorrendo 94,25 metros.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para a realização dos ensaios pino-disco.

Parâmetros	
Força normal	de 10 a 140 Newtons
Rotação	40 RPM
Distância do centro	25 mm
Velocidade de deslizamento	0,1 m/s
Tempo de deslizamento	900 s
Distância percorrida	94,25 m
Dureza média dos pinos	200 HV
Dureza média dos discos	600 HV
Temperatura ambiente	de 19 a 22°C
Umidade relativa	de 45 a 55%

Para obter maior precisão nos dados, foram obtidas três medidas para cada carga normal utilizada.

Os ensaios pino-disco foram realizados em uma máquina com uma base rotativa por um motor elétrico, com um suporte para o pino junto com um apoio para a adição de pesos. O tribômetro utilizado está descrito na Figura 21, foi montado pelo próprio Laboratório de Fenômenos de Superfície e antes da realização dos ensaios era calibrado com pesos previamente conhecidos.



Figura 21 - Tribômetro utilizado nos ensaios pino-disco.

Antes da realização do ensaio, o pino era submetido ao assentamento para que o deslizamento ocorresse com o máximo de área específica em contato com o disco. O assentamento consiste em manter o pino em contato com o disco com uma lixa 250 para desgastar o pino no mesmo formato do disco. Quando a superfície do pino estivesse totalmente em contato com a lixa, a amostra estaria pronta para o teste.

O pino assentado e o disco eram submetidos ao processo de limpeza onde eram mergulhados em álcool e submetidos a vibrações de alta frequência por 5 minutos. Depois eram secados com ar quente e medidas suas respectivas massas. Após a realização do ensaio, as amostras eram novamente limpas, secadas e pesadas.

O cálculo da perda de material por desgaste foi feito com base na diferença entre o peso dos pinos em balança com precisão de até quatro casas decimais (10^{-4} gramas).

Com alguns corpos de prova de cada carga normal aplicada no teste, foram embutidos com o corpo na transversal, para ser possível observar a deformação causada

pela força de atrito do contato. Foi tomado cuidado para que a direção de deslizamento ficasse transversal ao plano de observação.

Após a cura da baquelite, o corpo foi lixado até a metade do diâmetro para observar o centro do pino. As mostras foram atacadas com Cloreto Férrico, acusando os grãos e a característica de deformação.

Para a realização da dureza dos pinos de latão (em baquelite) foram utilizados a escala HB com 65Kg de força aplicada. Para medir a macro dureza do disco de aço, foi necessária a utilização da escala HC com 150Kg de força aplicada.

O coeficiente de atrito foi calculado dividindo a força tangencial média acusada pela curva característica de atrito, fornecida pelo tribômetro, pela força normal aplicada.

O comportamento da força de atrito característico pelo tempo apresentou dois comportamentos: estabilização e estável; que compreende o tempo de início do teste até a estabilização da força tangencial e a etapa “estável” em que é possível visualizar pouca variação. Para encontrar os coeficientes de atrito, foi necessário dividir os resultados até e depois a sua estabilização. Desta maneira foi possível encontrar a diferença de coeficientes de atrito média nas diferentes regiões.

Para analisar as superfícies atritadas com maior aprofundamento, foi utilizado o microscópio eletrônico do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP. Com ele foi possível identificar as regiões que possuíam diferentes composições químicas e a qualitativamente os elementos encontrados. Porém existe a limitação de que não é possível saber exatamente a composição e o arranjo da fase.

5. Resultados

5.1 Variação de massa

5.1.1 Variação de massa dos pinos

Os resultados de massas iniciais e finais dos pinos de todos os ensaios pino sobre disco realizados do latão 270, 260 e do cobre estão descritos no anexo I, anexo II e anexo III, respectivamente.

Foi possível plotar os gráficos de variação de massa dos pinos e dos discos, encontrando a média e o desvio padrão. A Figura 22 mostra a variação de massa dos pinos atritados no ensaio. Como esta variação foi negativa, o gráfico foi plotado em módulo para a melhor visualização.

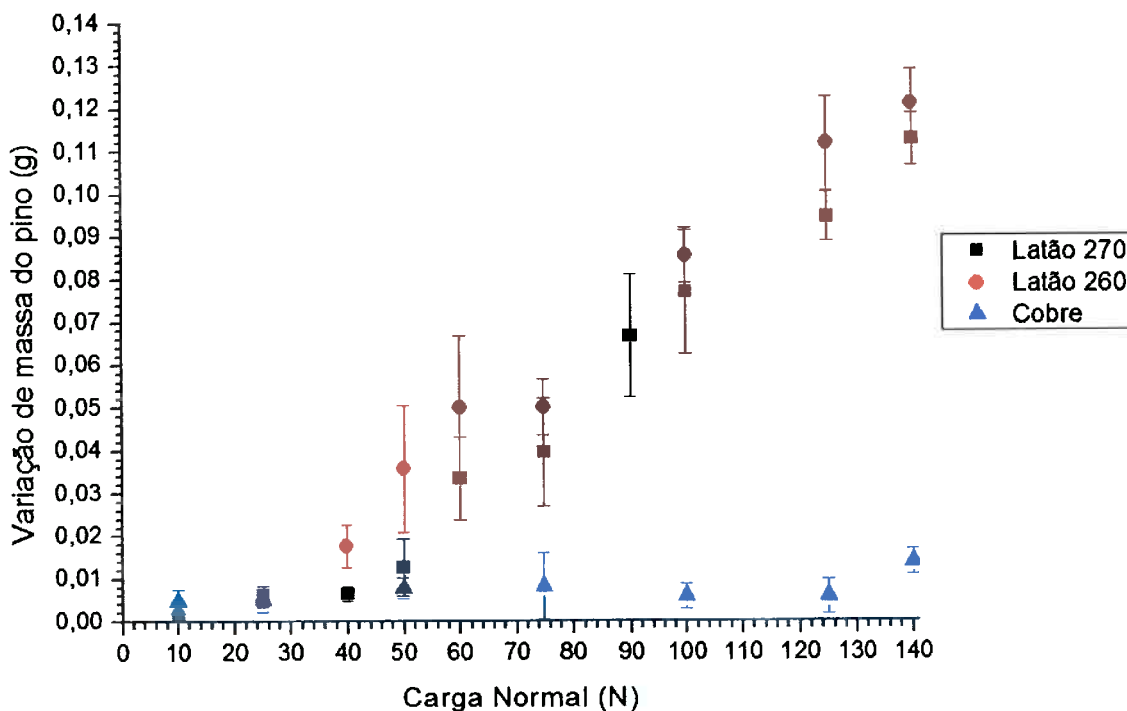


Figura 22 - Perda de massa do pino do latão 270, 260 e do cobre pela carga normal adicionada após a realização dos ensaios pin-on-disk.

Podem-se notar pelo menos dois regimes de desgaste do latão 270 no gráfico da Figura 22, onde é claramente visível dois regimes, antes e depois de 50 Newtons. A primeira região (à esquerda) não há grande variação da quantidade de desgaste ao aumentar a carga normal. Porém, depois dessa carga, a situação é oposta.

Ao analisar o comportamento de desgaste do latão 260, ocorre praticamente o mesmo fenômeno do ocorrido com o latão 270, porém com a carga normal de transição de regime iniciada com 25 Newtons.

Também é possível visualizar que embora não fosse possível constatar grande diferença entre os latões, o desgaste do cobre foi expressivamente menor.

5.1.2 Variação de massa dos discos

A Figura 23 representa a variação de massa no disco atritado pelos pinos de todas as composições ensaiadas.

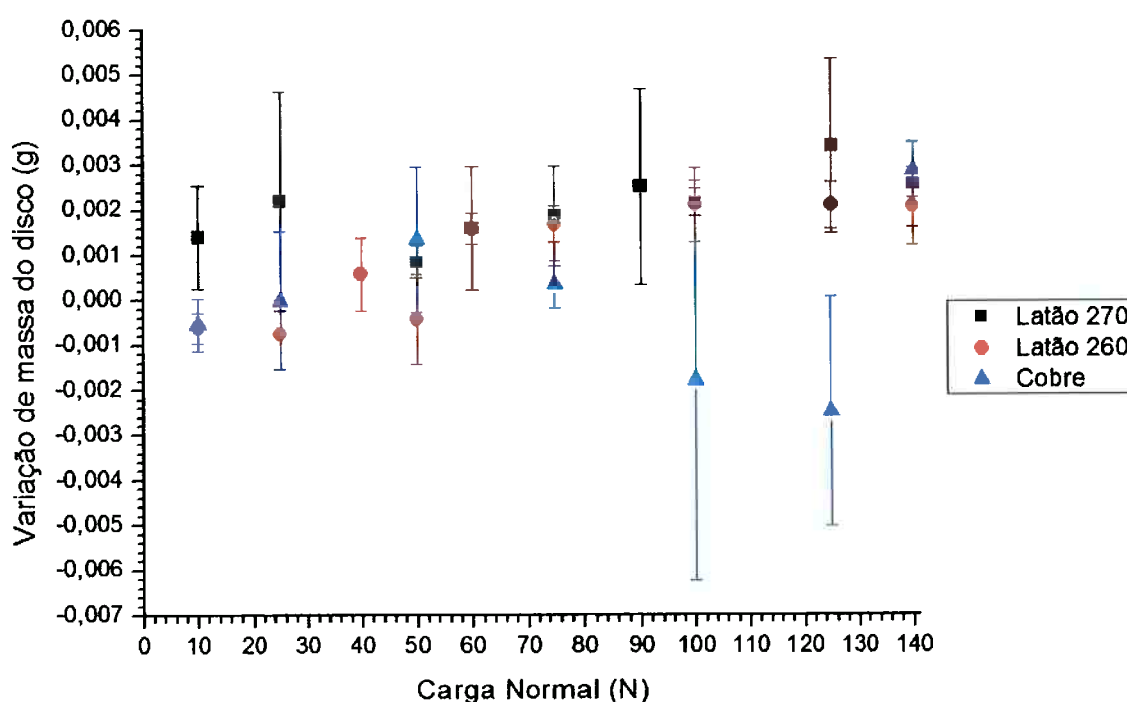


Figura 23 - Variação de massa dos discos atritados pelos pinos do latão 270, 260 e do cobre, pela carga normal aplicada após os ensaios pino sobre disco.

A variação de massa do disco do latão 270 foi positiva, ou seja, ganhou massa, e se manteve praticamente constante. No caso dos discos do latão 260, ocorreu perda de massa nos ensaios com carga normal baixa e ganho de massa nos cinco ensaios com maiores cargas. Nos discos do cobre, a variação foi muito baixa. Não obstante, nos ensaios com cargas de 100 e 125 Newtons ocorreu grande perda de massa.

Também é possível notar que os discos do latão 270 possuíram maior variação positiva de massa. Os discos do latão 260 tiveram maior média de perda nas cargas mais baixas, enquanto ocorreu o mesmo com os discos do cobre, porém em cargas mais altas.

5.2 Força e coeficiente de atrito

A Figura 24 mostra a força tangencial acusada no aparelho de ensaio do pino sobre disco. O aparelho forneceu a força de atrito em cada segundo que o teste foi realizado.

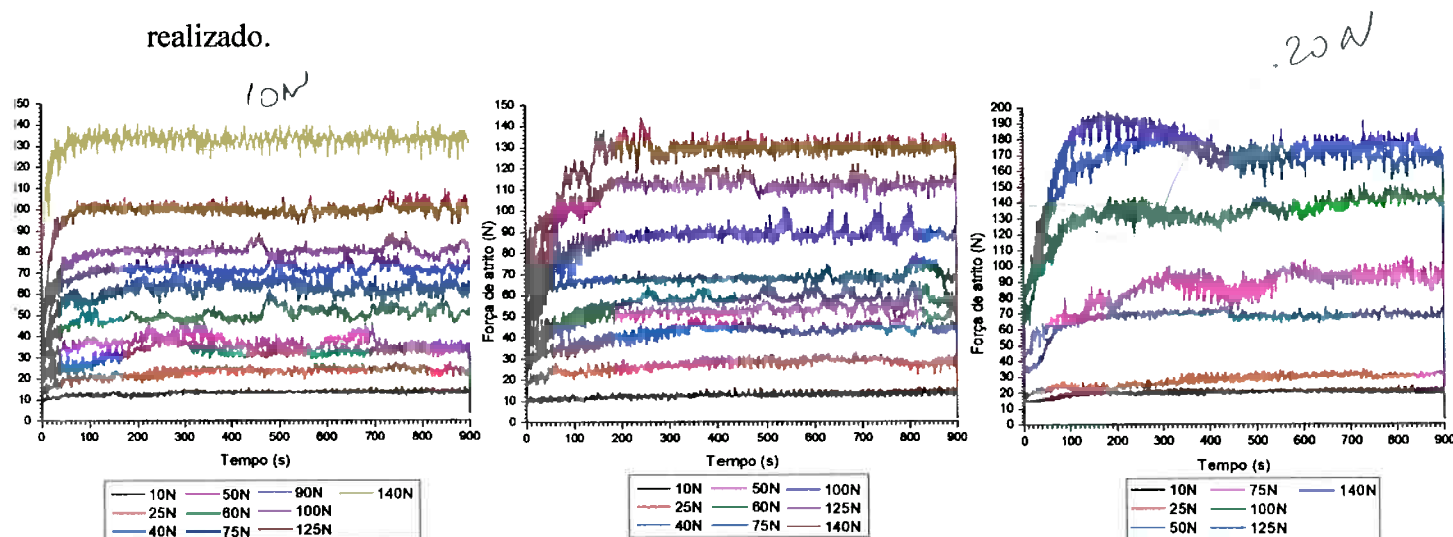


Figura 24 - Força de atrito pelo tempo dos ensaios pino sobre disco realizados o latão 270 (esquerda), o latão 260 (centro) e o cobre(esquerda).

É possível notar que existem duas etapas de comportamento no atrito, a primeira de estabilização do atrito e a segunda na qual o atrito não varia significativamente.

Observar-se também que o atrito leva um tempo para a estabilização. A Tabela 5 mostra o tempo de estabilização para cada carga normal.

Tabela 5 - Tempo de estabilização da força de atrito pela carga normal.

Carga normal (N)	10	25	40	50	60	75	90	100	125	140
Tempo de estabilização (s)										
Latão 270	4	8	-	10	20	25	30	45	50	60
Latão 260	5	10	30	40	40	50	-	120	180	300
Cobre	0	80	-	100	-	300	-	200	450	450

É possível notar que quanto maior a carga normal, maior o tempo de estabilização. Além disso, o cobre leva muito mais tempo para se estabilizar do que o latão 270, enquanto o latão 260 tem valores intermediários.

A Figura 25 mostra o coeficiente de atrito médio antes, depois da estabilização do atrito e em todo o ensaio, pela carga normal aplicada.

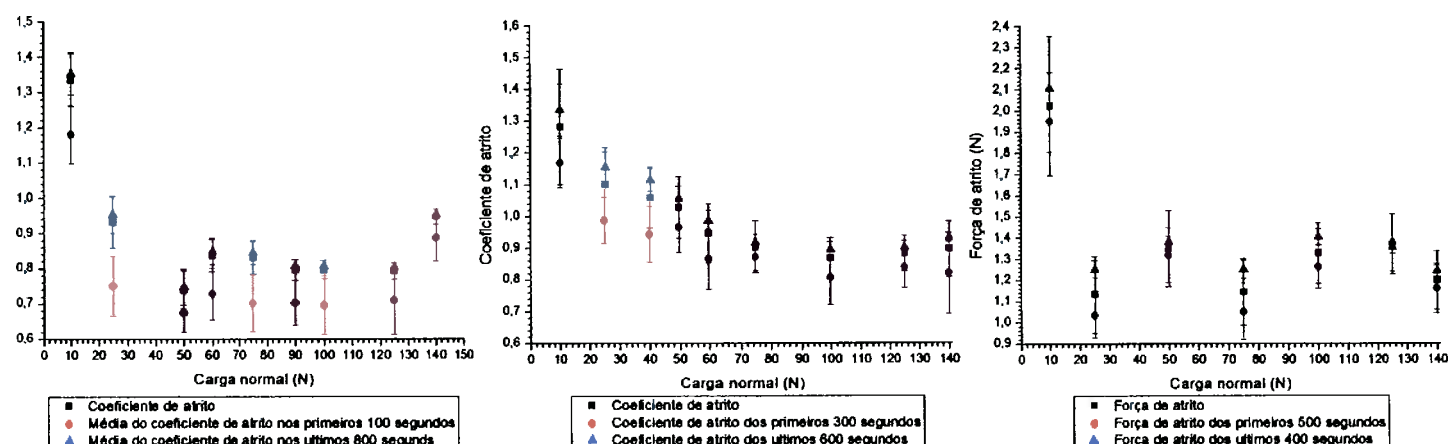


Figura 25 – Coeficiente de atrito pela carga normal aplicada no ensaio do latão 270 (esquerda), do latão 260 (centro) e do cobre (direita).

É possível notar que o latão 270 e o cobre apresentaram coeficiente de atrito praticamente constantes, salvo para cargas normais de menor valor. Para o latão 260, o seu coeficiente variou fortemente conforme a carga normal aplicada. Observa-se também que o coeficiente de atrito médio da região estabilizada é maior do que a região de estabilização, com exceção da carga normal de 125 Newtons do cobre, que ocorre o inverso.

A Figura 26 mostra um gráfico 3D com as forças de atrito pelo tempo de todas as ligas, oferecendo melhor visualização para melhor comparação.

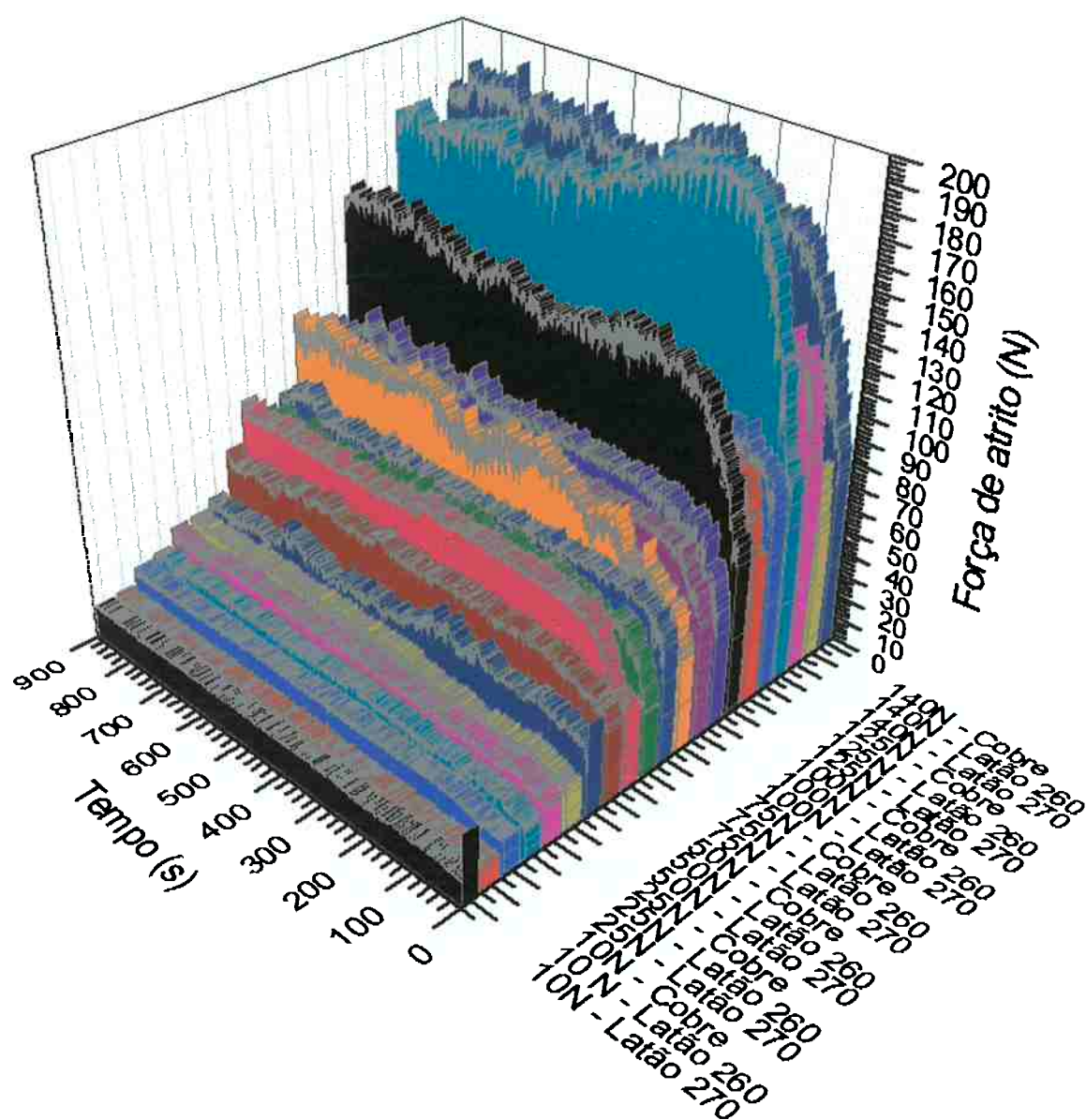


Figura 26 - Gráfico 3D da força de atrito e carga normal aplicada, pelo tempo, dos latões 270, 260 e do cobre intercaladas.

É possível notar que a força de atrito da Liga C é maior do que das outras ligas. Esta observação é ainda mais evidente nas maiores cargas aplicadas.

Para efeito de comparação, a Figura 27 mostra os valores de coeficiente de atrito médio de todas as ligas abordadas.

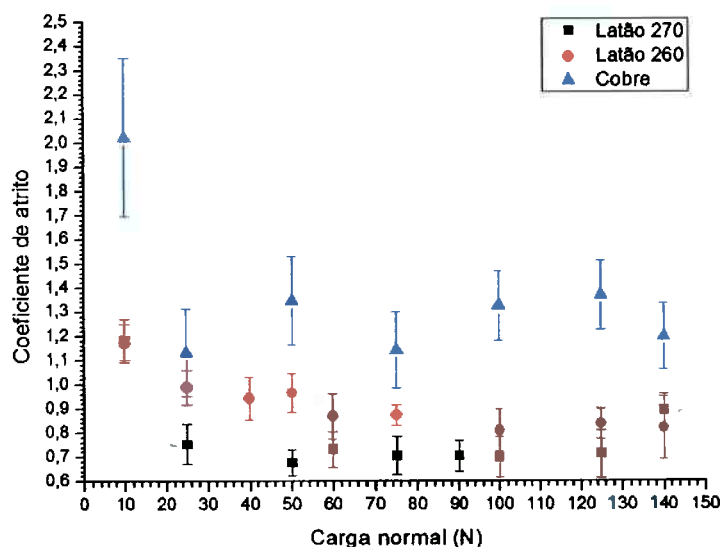


Figura 27 - Comparação dos comportamentos do coeficiente de atrito pela carga normal aplicada de todas as composições.

Observa-se que o latão 270 exibe menor coeficiente de atrito, no qual o primeiro valor, de carga normal de 10 Newtons, oferece maior valor, tendendo a estabilização posterior. O latão 260 possui maior coeficiente de atrito com carga normal mais baixa, e tende a diminuir gradativamente conforme o aumento de carga, porém a partir de 60 Newtons tende a estabilizar. Enquanto o coeficiente de atrito do cobre é maior do que a dos latões e com média maior do que um, ou seja, oferece força de atrito maior do que a carga normal aplicada.

5.3 Análise óptica (lupa)

5.3.1 Superfície dos pinos

A superfície da face atritada do pino do latão 270 nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 28.

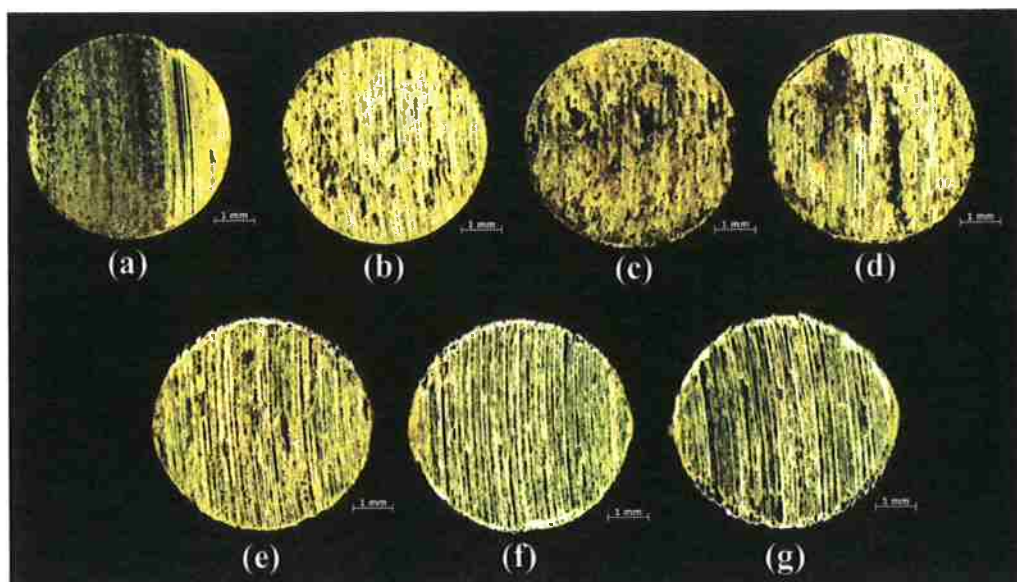


Figura 28 - Superfície atritada dos pinos de latão 270 nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais foram: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 60N (d); 90N (e); 100N (f); 125N (g).

É possível notar que os pinos atritados até 60 Newtons apresentavam regiões escuras em suas superfícies, cuja composição acusou a presença de óxidos pelo EDS do Microscópio Eletrônico de Varredura. A partir desta carga normal aplicada, as superfícies dos pinos se mostraram “limpas” de óxidos e com ranhuras direcionais de deslizamento.

A superfície da face atritada do pino de latão 260 nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 29.

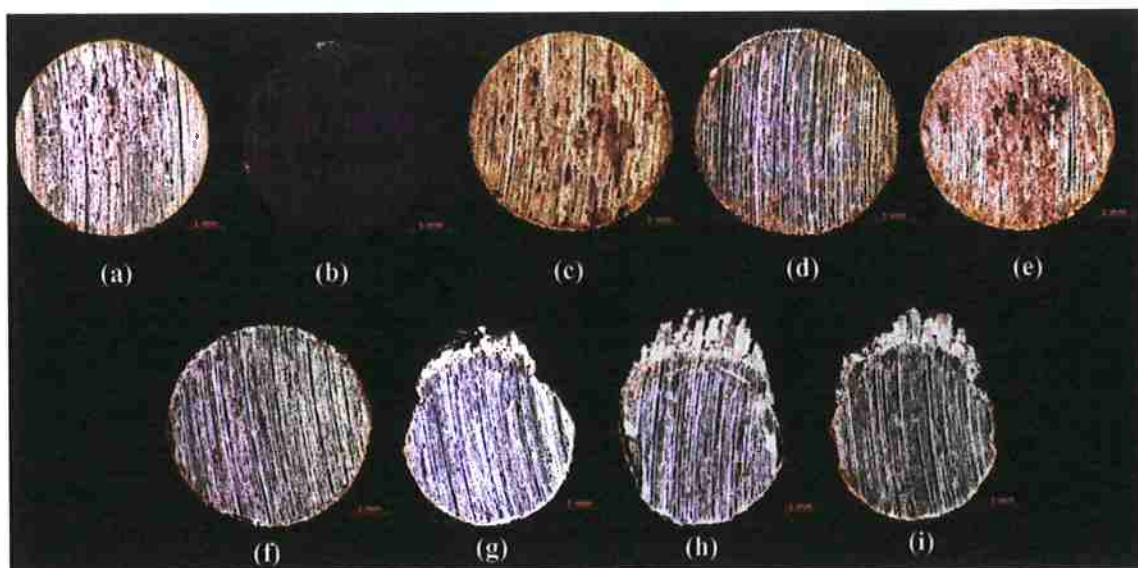


Figura 29 - Superfície atritada dos pinos de latão 260 nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais foram: 10N (a); 25N (b); 40N (c); 50N (d); 60N (e); 75N (f); 100N (g); 125N (h); 140N(i).

É possível notar que os pinos atritados até 60 Newtons apresentavam regiões escuras em suas superfícies, cuja composição acusou a presença de óxidos pelo EDS do Microscópio Eletrônica de Varredura.

A partir da carga normal de 60 Newtons, os pinos começaram a apresentar deformação da superfície, evidentes nas cargas superiores à 100 Newtons que exibe a formação de uma "cauda". Também apresentaram ranhuras de deslizamento, exibindo somente o metal matriz de latão 260 e rabos de material deformado na região de sentido oposto à força de atrito.

A superfície da face atritada do pino de cobre nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 30.

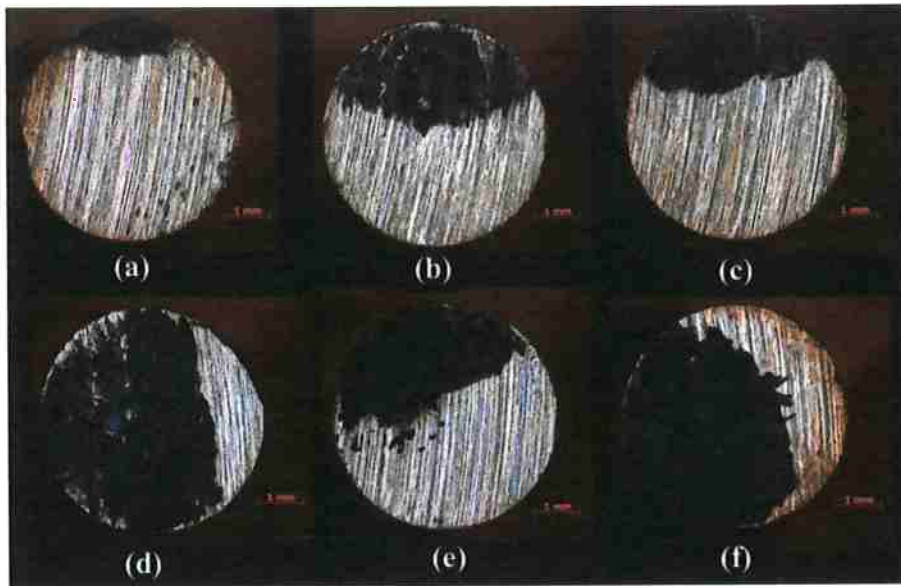


Figura 30 - Superfície atritada dos pinos de cobre nas diferentes cargas normais aplicadas com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais foram: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 75N (d); 100N (e); 140N (f).

É possível notar que a carga normal não gerou grande diferença na formação da superfície preta, apesar de aparentemente apresentar maior quantidade conforme maior for a carga normal aplicada. A composição dessa região escura acusou a presença de oxigênio e ferro pelo EDS do Microscópio Eletrônica de Varredura.

5.3.2 Superfície dos discos

A superfície do disco atritado pelos pinos de latão 270 nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 31.

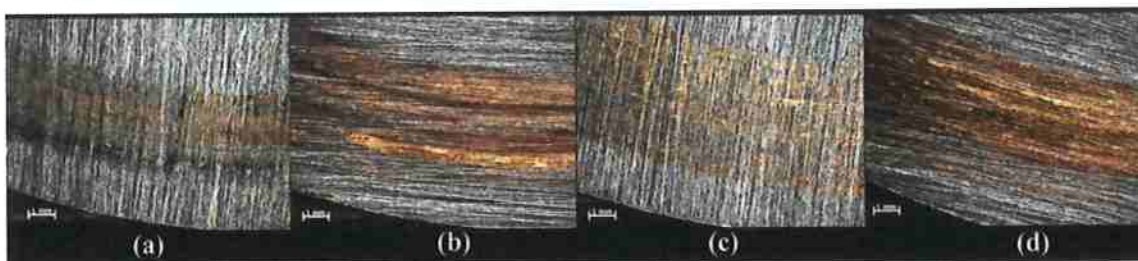


Figura 31 - Tribofilme impresso nos discos atritados com os pinos de latão 270 com diferentes cargas normais com ampliação de 10 vezes. As cargas normais correspondentes são: 10N (a); 75N (b); 100N (c); 125N (d).

O tribofilme impresso no disco apresentava coloração preta de baixa intensidade com 10 Newtons. Com 75 Newtons a coloração foi avermelhada com as bordas pretas. Com 100 e 125 Newtons a coloração foi amarelada, com intensidade mais expressiva quanto maior a carga normal aplicada.

A superfície do disco atritado pelos pinos de latão 260 nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 32.



Figura 32 - Tribofilme impresso nos discos atritados com os pinos de latão 260 com diferentes cargas normais com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais correspondentes são: 40N (a); 50N (b).

O tribofilme impresso nos discos atritados com os pinos de latão 260 apresentava comportamento parecido com os do latão 270, com coloração preta de baixa intensidade com 25 Newtons. Porém, com 50 Newtons a coloração foi amarelada, aumentando sua intensidade proporcionalmente com a carga normal aplicada.

A superfície do disco atritado pelos pinos de cobre nas diferentes cargas normais aplicadas pode ser observada na Figura 33.

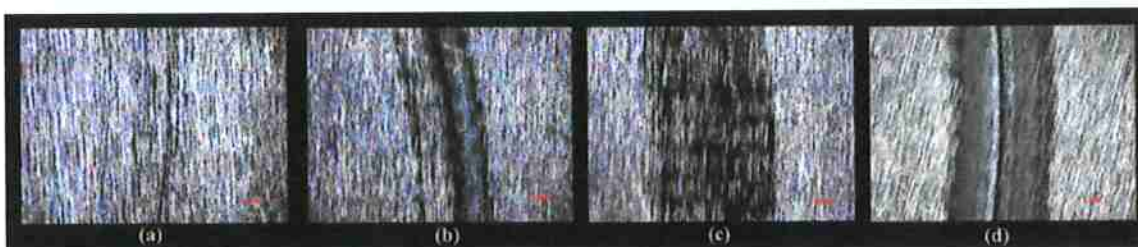


Figura 33 - Tribofilme impresso nos discos atritados com pinos de cobre com diferentes cargas normais com ampliação de 12,5 vezes. As cargas normais correspondentes são: 10N (a); 25N (b); 50N (c); 125N (d).

O tribofilme impresso nos discos atritados com pinos de cobre quase não apresentava resquício nas cargas normais mais baixas como de 10 Newtons. Aos 25 Newtons foi possível notar um tribofilme de coloração preta cuja sua intensidade aumentava proporcionalmente com a quantidade de carga normal aplicada, como é possível ver em na carga de 75 Newtons. Com 125 Newtons a coloração geral continuou sendo preta, porém com uma faixa “limpa” onde exibia o aço matriz aparentemente polido.

5.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

5.4.1 MEV da superfície dos pinos

Utilizando o microscópio eletrônico de varredura (MEV), que possui maior resolução do que os outros tipos de microscópios, foi possível enxergar mais detalhes das superfícies dos pinos e dos discos. A Figura 34 mostra microscopia de elétrons secundários e retroespalhados da superfície do pino de latão 270 atritado com 60 Newtons de carga normal.

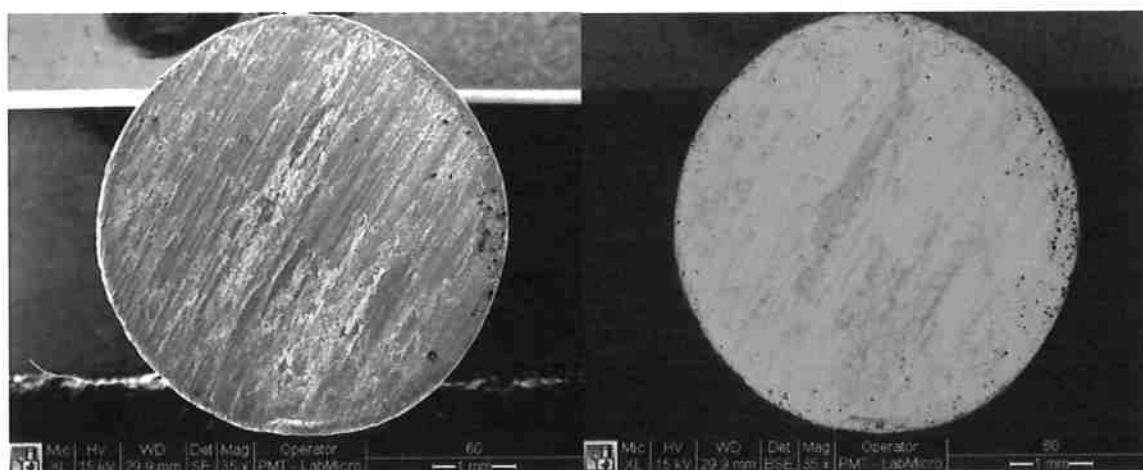


Figura 34 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino latão 270 atritado com carga normal de 60 Newtons.

Pode-se notar que a superfície do pino apresenta topografia irregular, além de regiões escuras que não correspondem ao metal matriz.

A Figura 35 mostra o resultado do EDS apontado na parte escura do pino de latão 270, atritado com carga normal de 60 Newtons.

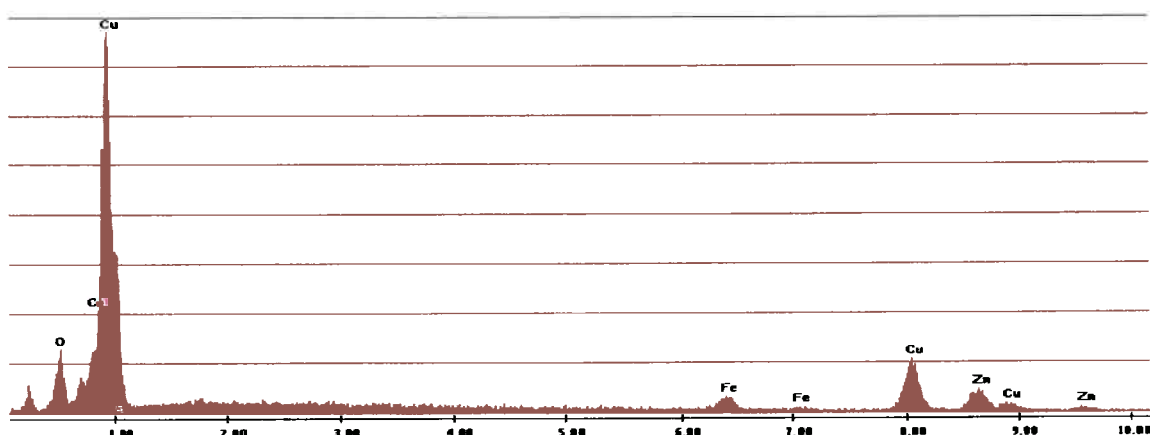


Figura 35 - Resultado do EDS realizado na mancha escura da superfície do pino de latão 270 atritado com 60 Newtons.

É possível notar que há a presença de oxigênio, cobre e zinco.

A Figura 36 mostra a microscopia de elétrons secundários e retroespalhados da superfície do pino de latão 270 atritado com 75 Newtons de carga normal.

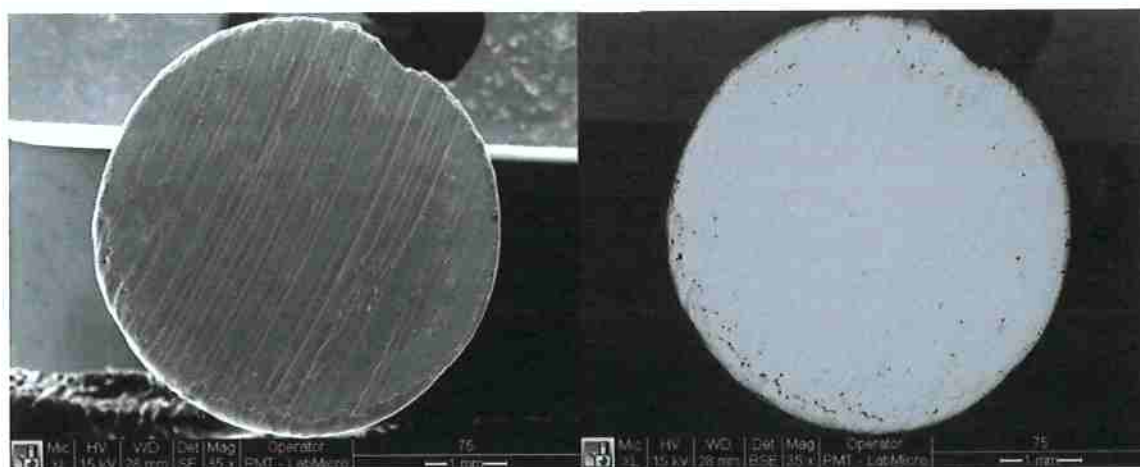


Figura 36 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 270 atritado com carga normal de 75 Newtons.

É possível notar que a superfície dos pinos atritados com maiores cargas teve morfologia mais lisa do que os atritados com menores cargas.

Com as microscopias eletrônicas dos pinos, é evidente que a morfologia das superfícies se mostrou diferentes com baixas cargas (entre 10 a 60 Newtons) se comparado com as com altas cargas (entre 75 a 140 Newtons).

A Figura 37 mostra a microscopia de elétrons secundários e retroespalhados da superfície do pino de latão 260 atritado com 40 Newtons de carga normal.

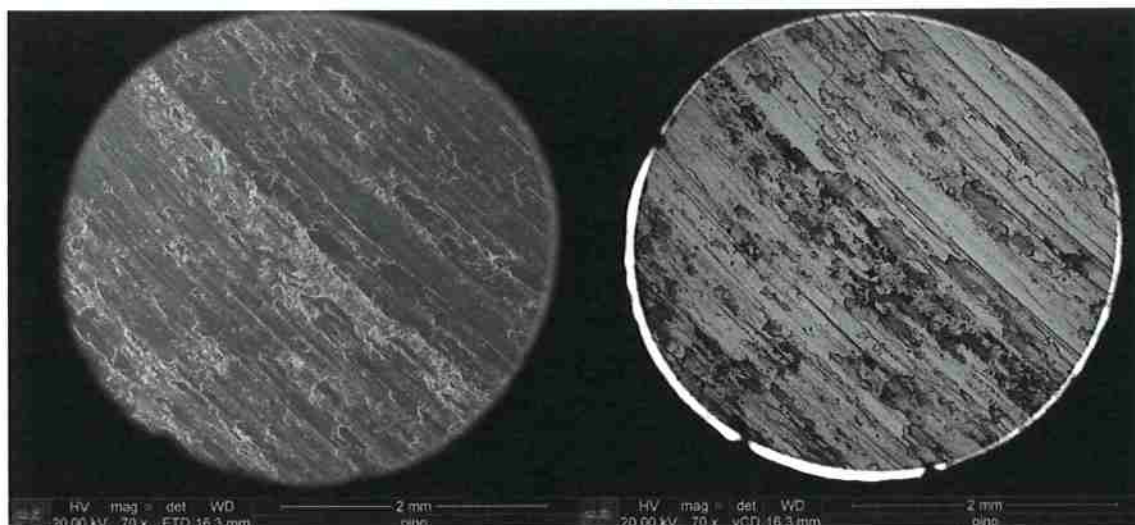


Figura 37 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 260 atritado com carga normal de 40 Newtons.

Como ocorrido no pino de latão 270 com 60 Newtons, o pino de latão 260 da Figura 37 também apresentou superfície com topografia irregular, além de regiões escuras que não correspondem ao metal matriz.

A Figura 38 mostra o resultado do EDS apontado na parte escura do pino de latão 260, atritado com carga normal de 40 Newtons.

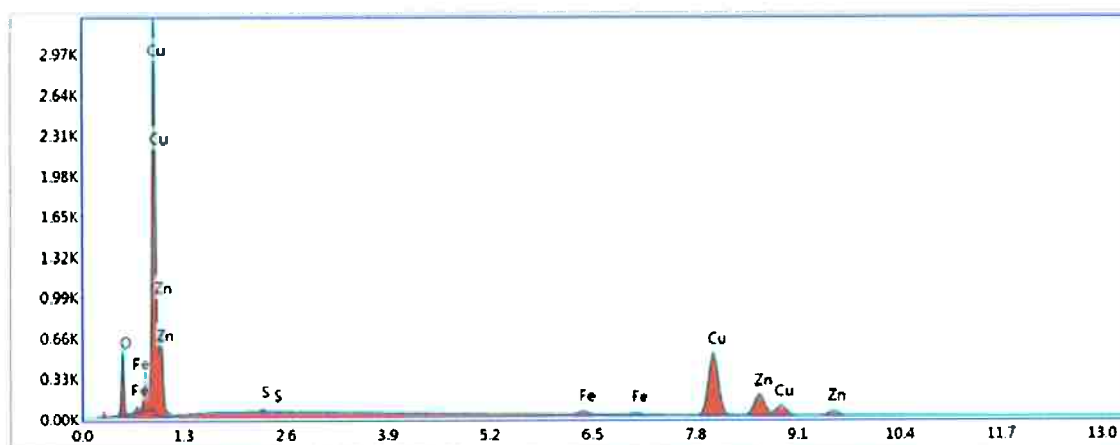


Figura 38 - Resultado do EDS realizado na mancha escura da superfície do pino de latão 260 atritado com 40 Newtons.

É possível notar que há a presença de oxigênio, cobre e zinco.

A Figura 39 mostra a microscopia de elétrons secundários e retroespalhados da superfície do pino de latão 260 atritado com 140 Newtons de carga normal.

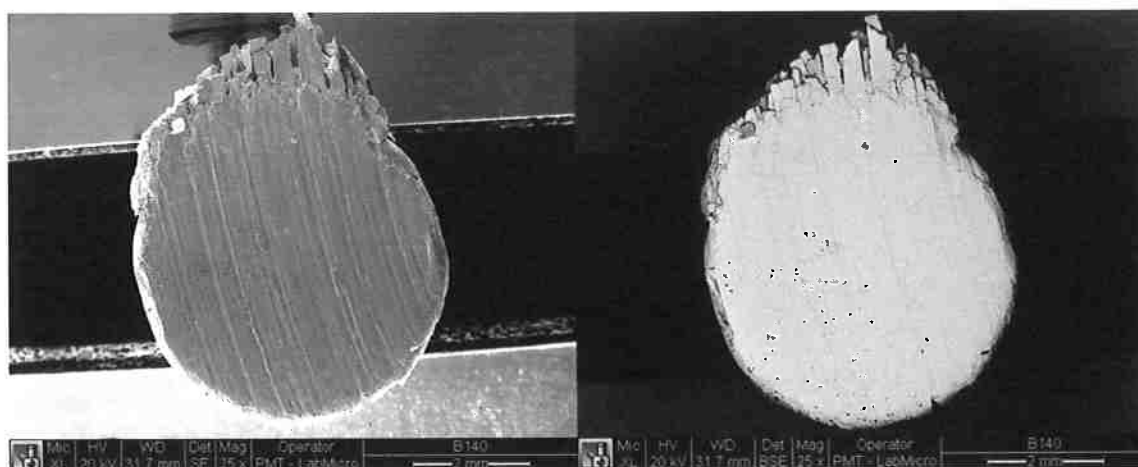


Figura 39 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de latão 260 atritado com carga normal de 140 Newtons.

Observa-se que foi formada uma extremidade sobressaliente da área do pino original devido à alta deformação.

A Figura 40 mostra a microscopia de elétrons secundários e retroespalhados da superfície do pino de cobre atritado com 25 Newtons de carga normal.

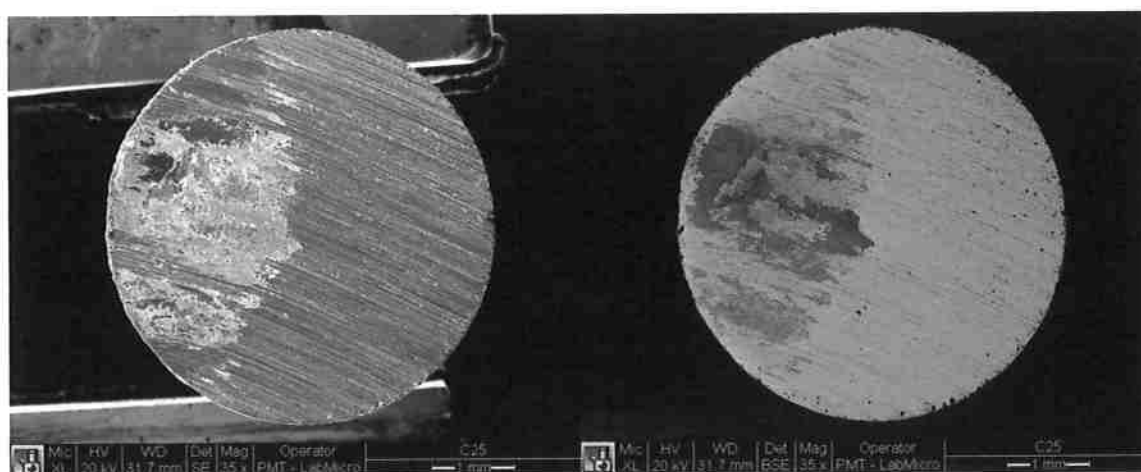


Figura 40 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do pino de cobre atritado com carga normal de 25 Newtons.

É possível notar que a parte de primeiro contato com a velocidade do disco ainda apresentava a morfologia original da lixa de assentamento. Na parte de trás, observa-se uma região com topografia bagunçada com regiões que não são parte do metal matriz, de coloração preta.

A Figura 41 mostra o resultado do EDS apontado na parte escura do pino de cobre, atritado com carga normal de 25 Newtons.

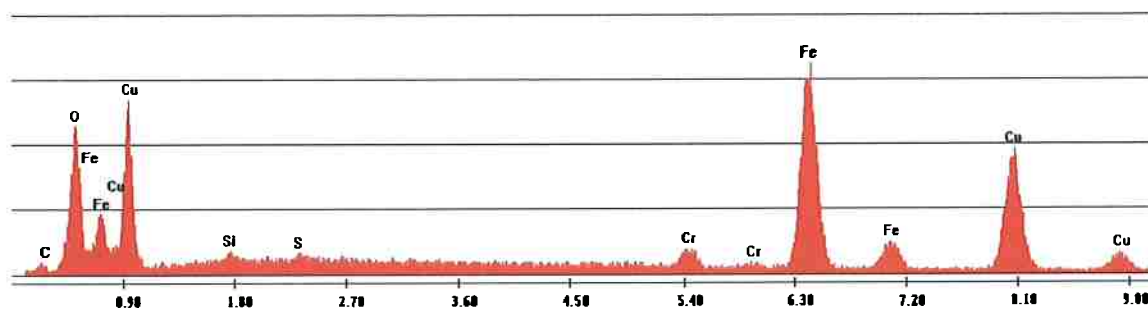


Figura 41 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do pino de cobre atritado com 25 Newtons.

É possível notar a presença de predominante de oxigênio e ferro na superfície do pino.

5.4.2 MEV da superfície dos discos

As microscopias eletrônicas do tribofilme impresso no disco atritado pelo pino de latão 270 com carga de 10 Newtons podem ser observadas na Figura 42.



Figura 42 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 270 com carga normal de 10 Newtons.

É possível notar que o tribofilme é fino, porém demarca uma alteração na topografia da superfície.

A Figura 43 mostra o resultado do EDS na mancha de diferente coloração do tribofilme da Figura 42.

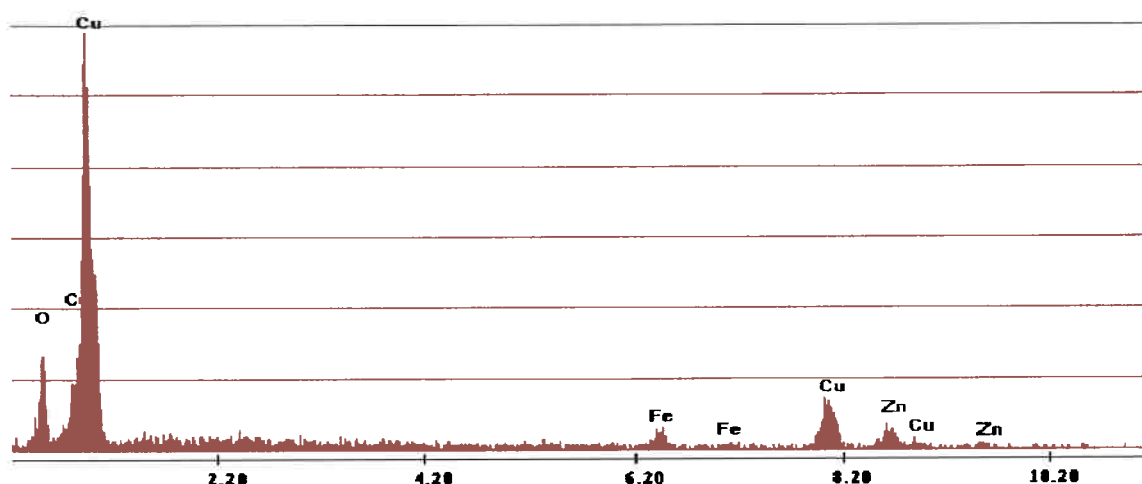


Figura 43 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 270 com 10 Newtons.

É possível notar a presença de oxigênio, cobre e resquícios de ferro e zinco.

Na Figura 44 é possível observar o MEV da região atritada no disco pelo pino de latão 270 com carga de 100 Newtons.

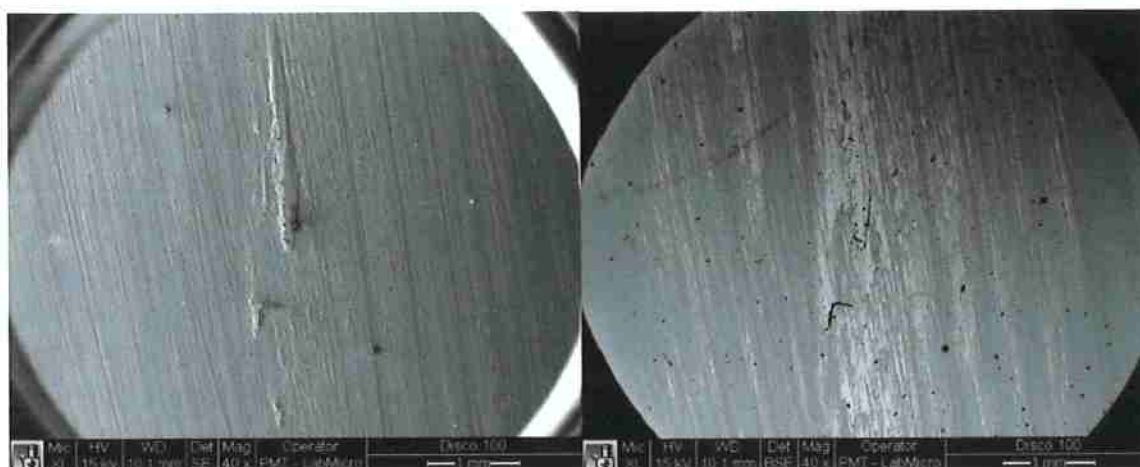


Figura 44 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 270 com carga normal de 100 Newtons.

É possível notar que há a presença de variação de composição química na superfície atritada, indicando que houve adesão do metal matriz do pino no disco.

A Figura 45 mostra o resultado do EDS na mancha de diferente coloração do tribofilme da Figura 44.

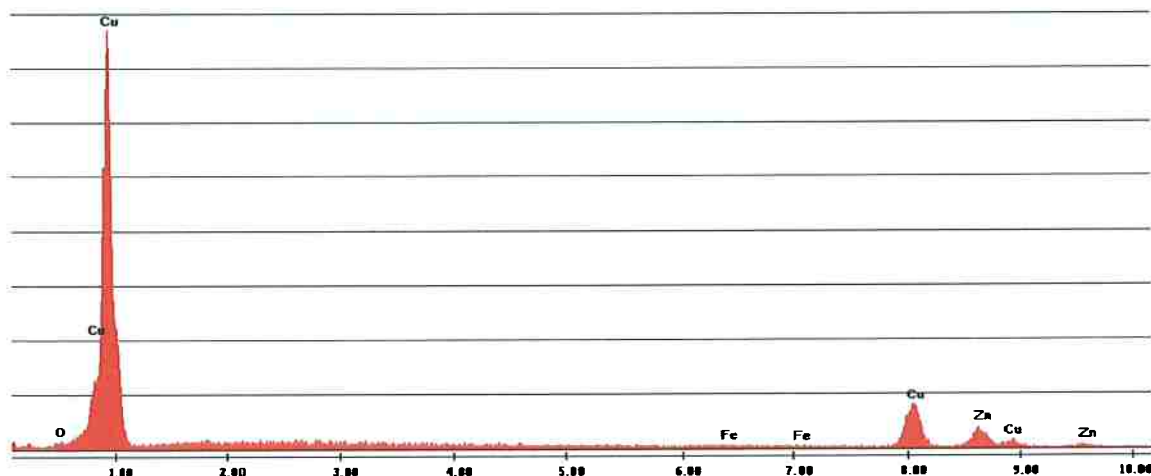


Figura 45 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 270 com 100 Newtons.

É possível notar que quase não há a presença de oxigênio e a composição da partícula é bastante parecida com a composição original dos pinos de latão 270.

As partículas aderidas nas superfícies dos discos para cargas superiores as de 100 newtons apresentavam as mesmas características, porém com maior intensidade de coloração amarelada na trilha.

As microscopias eletrônicas do tribofilme impresso no disco atritado pelo pino de latão 260 com carga de 25 Newtons podem ser observadas na Figura 46.



Figura 46 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 260 com carga normal de 25 Newtons.

É possível notar que o tribofilme formado segregou nas renhuras naturais do disco.

A Figura 47 mostra o resultado do EDS na mancha de diferente coloração do tribofilme da Figura 46.

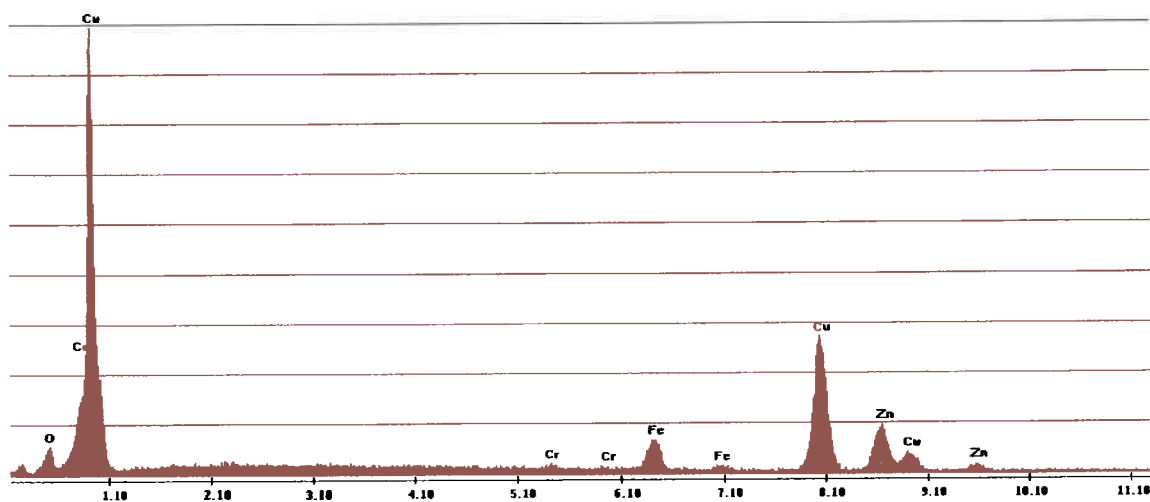


Figura 47 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 260 com 25 Newtons.

É possível notar a presença de oxigênio, cobre, zinco e resquícios de ferro.

As microscopias eletrônicas do tribofilme impresso no disco atritado pelo pino com carga de 100 Newtons podem ser observadas na Figura 48.

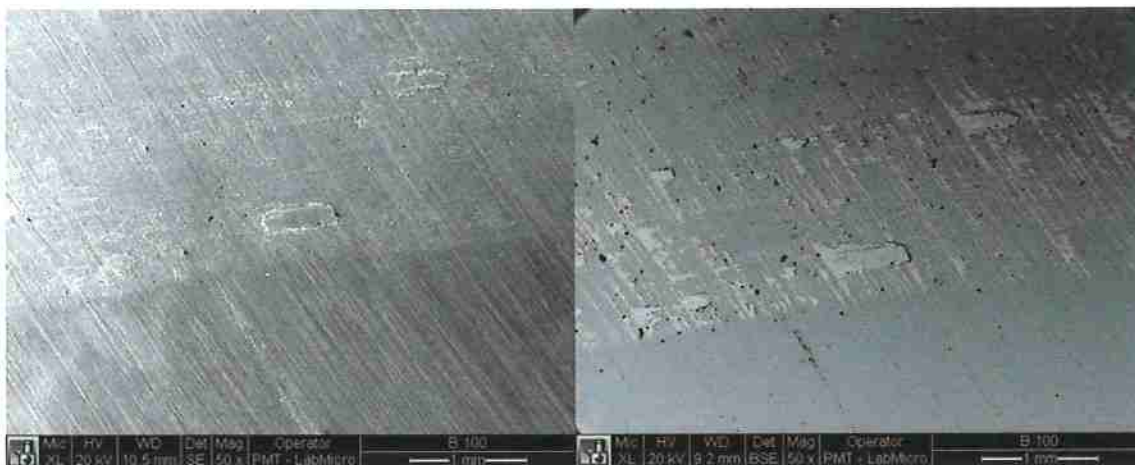


Figura 48 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de latão 260 com carga normal de 100 Newtons.

É possível notar que há adesão de partículas mais grosseiras na superfície do disco, alterando a topografia com as partículas aderidas.

A Figura 49 mostra o resultado do EDS na partícula pretuberante do tribofilme da Figura 48.

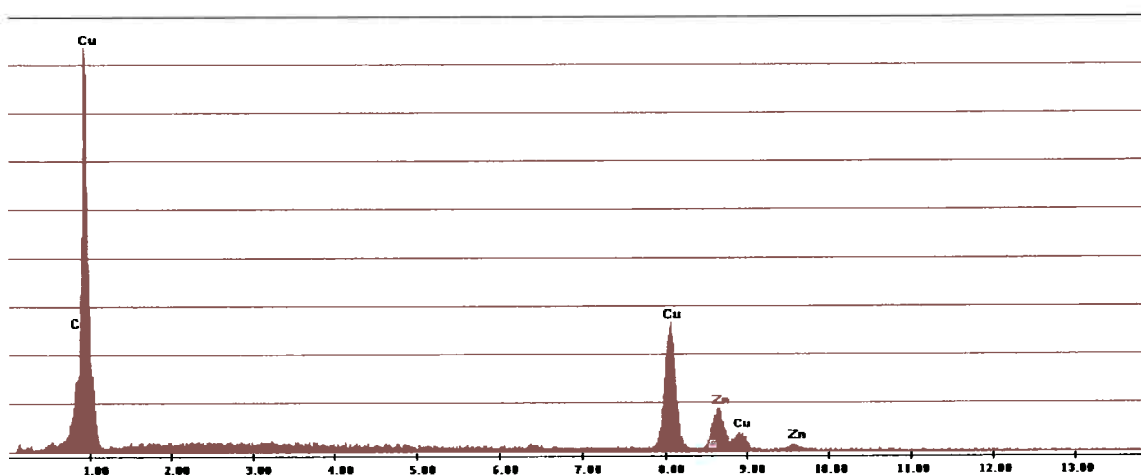


Figura 49 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de latão 260 com 100 Newtons.

É possível notar que a partícula aderida contém praticamente a mesma composição do metal base do pino de latão 260.

As partículas aderidas nas superfícies dos discos para cargas superiores as de 100 Newtons também apresentavam as mesmas características, porém com maior intensidade de coloração amarelada na trilha.

As microscopias eletrônicas do tribofilme impresso no disco atritado pelo pino de cobre com carga de 10 Newtons podem ser observadas na Figura 50.

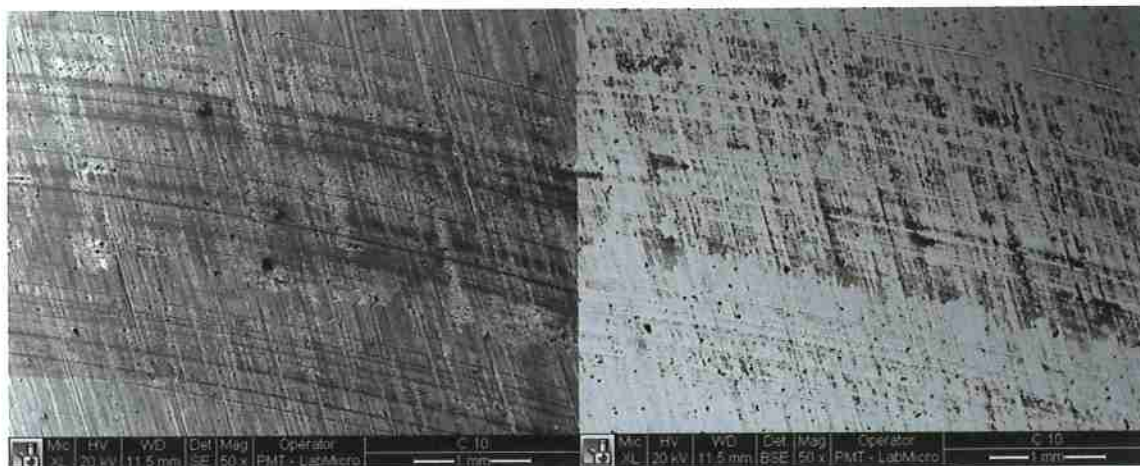


Figura 50 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de cobre com carga normal de 10 Newtons.

É possível notar que o pino arranhou o disco pelos sulcos observados no MEV de elétrons secundários.

A Figura 51 mostra o resultado do EDS na região escura do tribofilme da Figura 50.

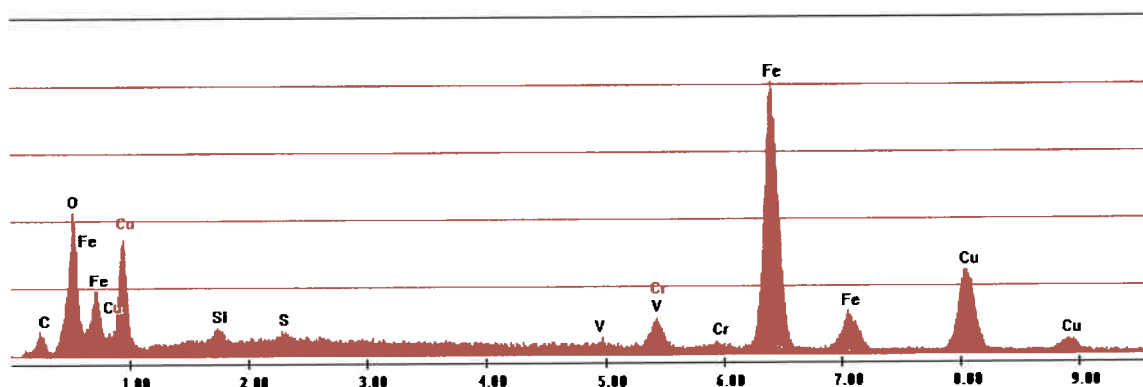


Figura 51 - Resultado do EDS realizado na mancha preta da superfície do disco atritado com pino de cobre com 10 Newtons.

É possível notar a presença de oxigênio, ferro e resquícios de cobre.

As microscopias eletrônicas do tribofilme impresso no disco atritado pelo pino de cobre com carga de 50 Newtons podem ser observadas na Figura 52.

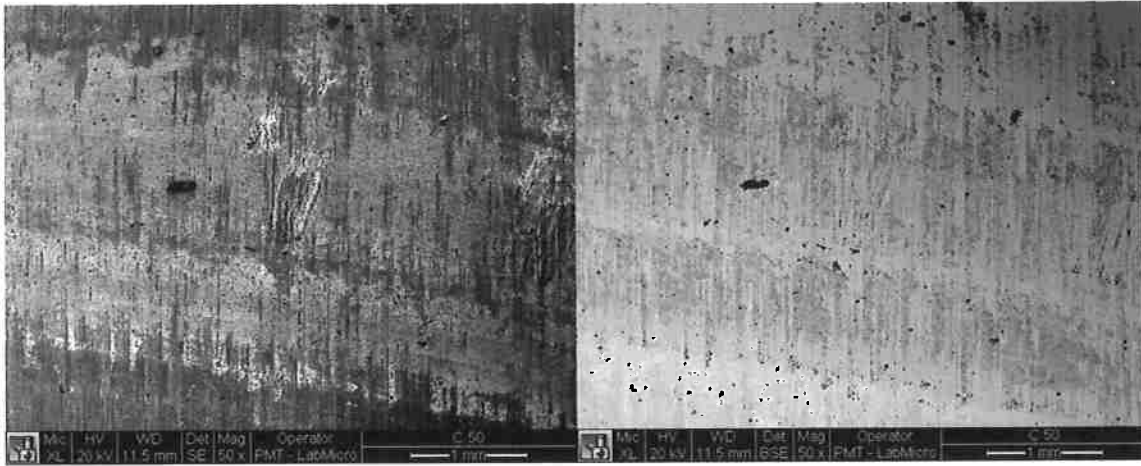


Figura 52 - Microscopia eletrônica de varredura da superfície do disco atritado pelo pino de cobre com carga normal de 50 Newtons.

É possível notar que houve alteração na topografia da superfície do disco, junto maior quantidade de material aderido.

5.5 Metalografia

5.5.1 Metalografia dos pinos de latão 270

A Figura 53 mostra a secção transversal da metade de um pino de latão 270 atritado com carga normal de 25, 50, 60 e 100 Newtons.

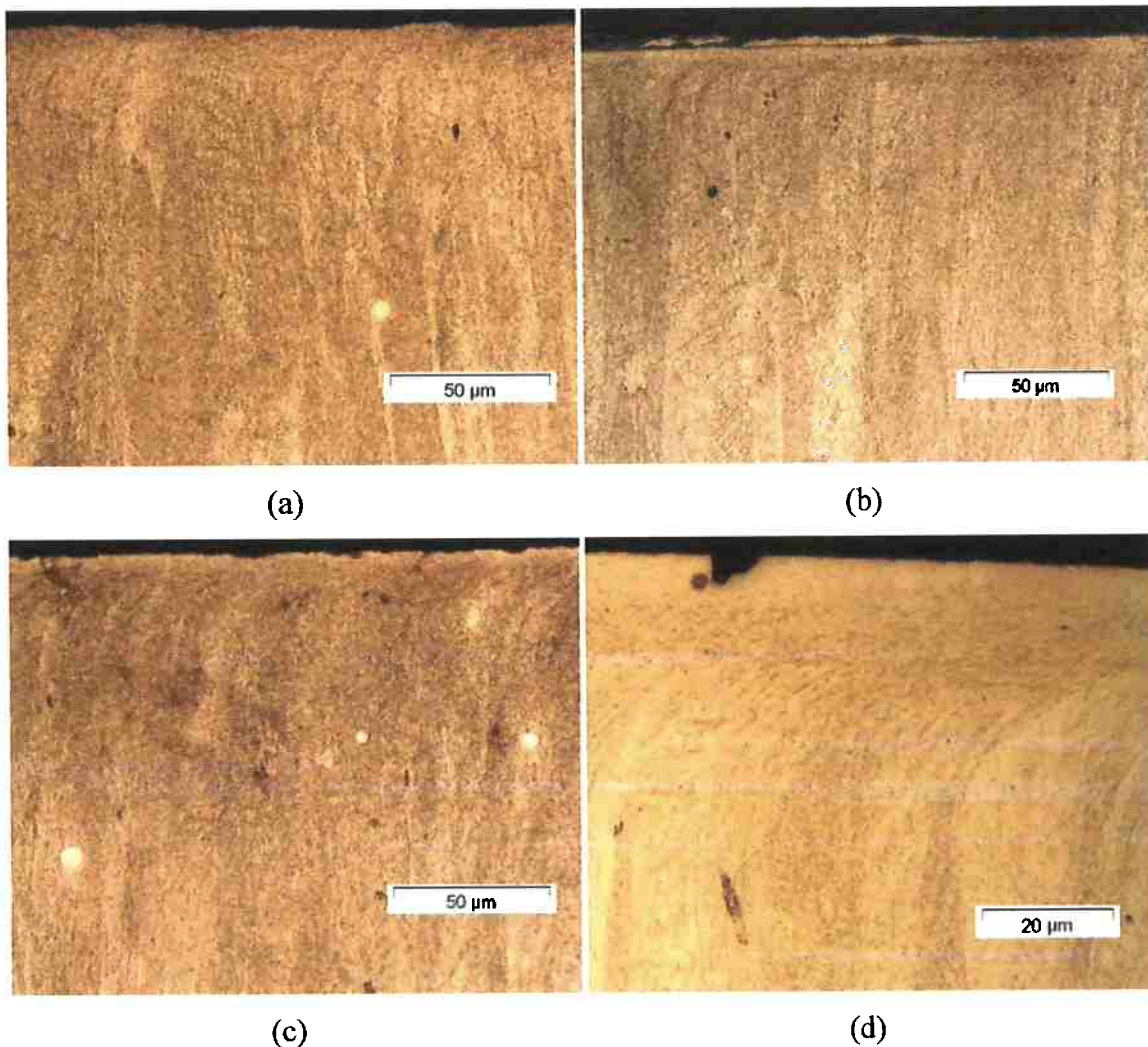


Figura 53 – Microscopia óptica da secção transversal da metade de um pino do latão 270 atritado com carga normal de 25 Newtons (a), 50 Newtons (b), 60 Newtons (c) com 500 vezes de aumento e com 100 Newtons (d) com 1000 vezes de aumento.

É possível notar microestrutura típica de materiais trefilados com fibras de grãos direcionadas na direção de trefilação, além da deformação nos locais perto da superfície atritada, com as fibras acompanhando a direção de deslizamento (oposto da força de atrito).

Observa-se que quanto maior a carga normal aplicada, maior a região de deformação plástica e maior a tendência de inclinação dos grãos para alinhamento com a direção de escorregamento. As superfícies não apresentam grande alteração na topografia da superfície, embora na micrografia de carga normal 50 Newtons, é possível observar uma camada de possível óxido.

5.5.2 Metalografia dos pinos de latão 260

A Figura 54 mostra a secção transversal da metade de um pino de latão 260 atritado com carga normal de 40 Newtons, 60 Newtons, 75 Newtons e 100 Newtons.

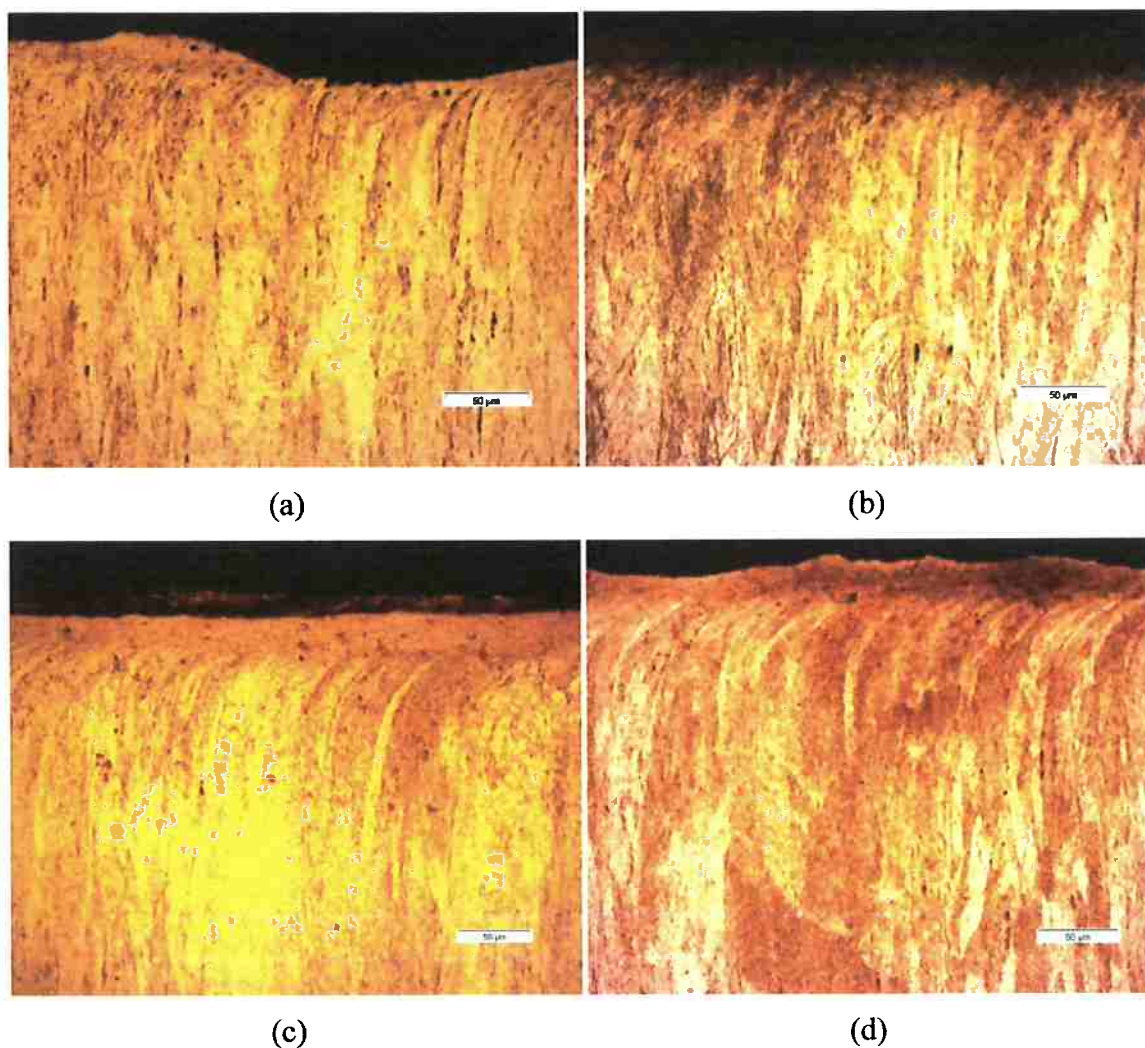


Figura 54 - Microscopia óptica da secção transversal da metade de um pino do latão 260 atritado com carga normal de 40 Newtons (a), 60 Newtons (b), 75 Newtons (c) e 100 Newtons (d) com 500 vezes de aumento.

É possível notar grande irregularidade da superfície atritada e que apresenta uma região escura no limiar da extremidade. Analogamente ao comportamento apresentado nas micrografias da seção transversal do latão 270, quanto maior a carga normal, maior a região deformada plasticamente. Observa-se também que com cargas maiores do que 75 Newtons, uma região que compreende à zona 3 da Figura 16 , que representa a região com grãos refinados.

5.5.3 Metalografia dos pinos de cobre

A Figura 55 mostra a seção transversal da metade de um pino de cobre atritado com carga normal de 25 Newtons.

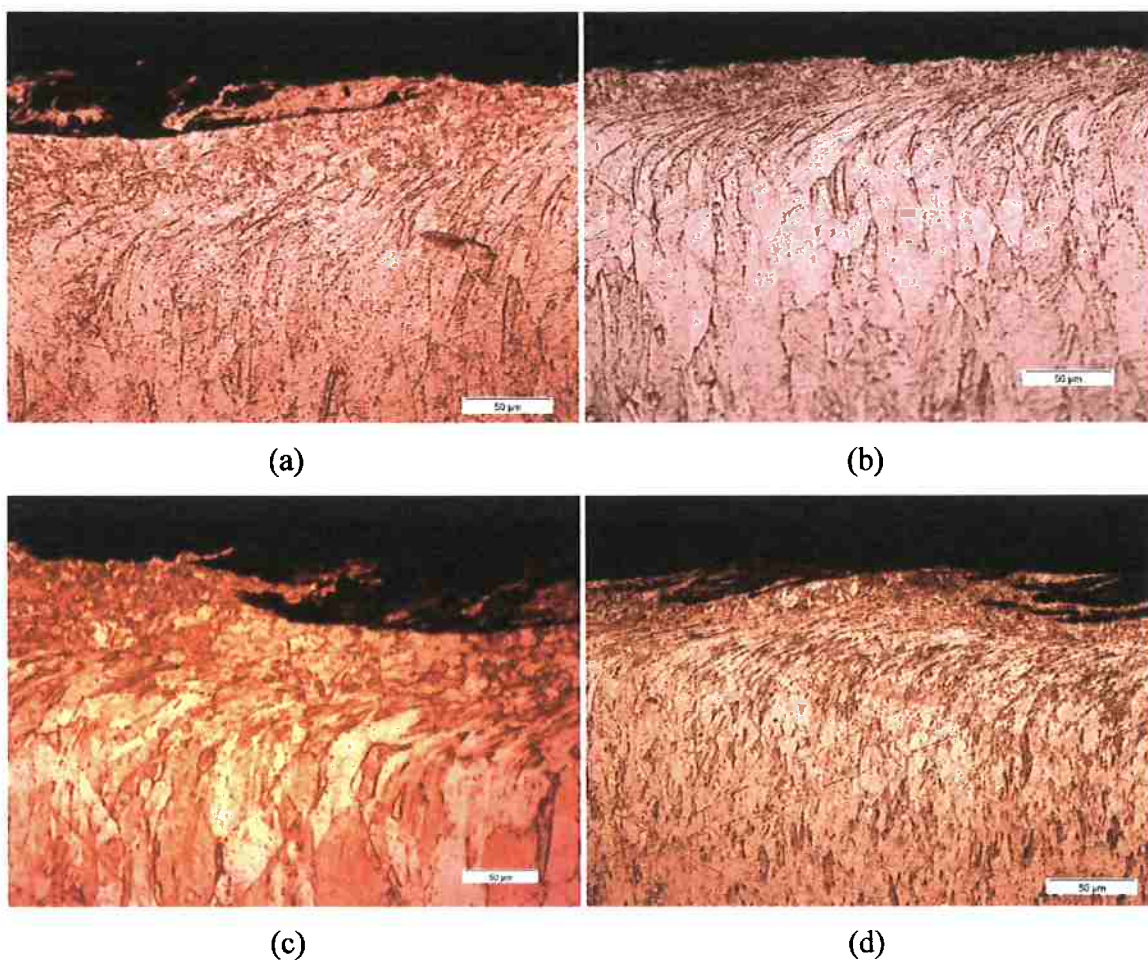


Figura 55 - Microscopia óptica da seção transversal da metade dos pinos de cobre atritado com carga normal de 25 Newtons(a), 50 Newtons (b), 100 Newtons (c) e 125 Newtons (d) com 500 vezes de aumento.

É possível notar que a planicidade da superfície da matriz de cobre foi alterada ou transformada, além de que as “linhas” de trefilação começam a apresentar tendência de alinhamento com a deformação no sentido do escorregamento.

Observa-se que perto da superfície, existe tendência da microestrutura se alinhar com a direção oposta à da força de atrito. Além disso, a camada mais próxima de contato aparenta ser a zona 3 da Figura 16. Apesar do arraste da deformação, a superfície de contato do pino apresenta grandes irregularidades na qual aparenta ser algum tipo alta deformação plástica localizada.

6. Discussão

Todas as variações de massa dos pinos foram negativas, ou seja, houve desgaste. A taxa de desgaste variou linearmente conforme a carga normal aplicada no caso dos latões 270 e 260 e permaneceu praticamente constante para o cobre. A perda de massa entre dos latões foram muito parecidas desgastando mais do que o cobre, principalmente com cargas normais maiores. A Tabela 6 mostra todas as informações até o momento apresentadas dos testes com pinos de latão 270.

Tabela 6 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de latão 270 pela carga normal aplicada.

Carga Normal (N)	Coeficiente de atrito (μ)	Perda de massa (g)	Coeficiente de desgaste (K)	Superfície do pino	Superfície do disco
10	1,34	0,0010	0,00025	Manchas pretas	Região preta
25	0,93	0,0060	0,00059	Manchas pretas	Região preta
50	0,74	0,0128	0,00063	Manchas pretas	Região preta
60	0,84	0,0336	0,00138	Manchas pretas	Região avermelhada
75	0,83	0,0396	0,00130	Superfície lisa	Região avermelhada
90	0,79	0,0667	0,00183	Superfície lisa	Região amarela
100	0,80	0,0772	0,00191	Superfície lisa	Região amarela
125	0,79	0,0948	0,00187	Superfície lisa	Região amarela
140	0,95	0,1128	0,00199	Superfície lisa	Região amarela

Está claro que existe variação de coeficiente de desgaste entre a carga normal de 50 e 90 Newtons, passando por uma transição em que o valor do coeficiente é intermediário. A superfície dos pinos apresenta manchas pretas, passando para superfícies lisas e o trajeto dos pinos no disco possui coloração avermelhada.

A Tabela 7 mostra todas as informações até o momento apresentadas dos testes com pinos de latão 260.

Tabela 7 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de latão 260 pela carga normal aplicada.

Carga Normal (N)	Coeficiente de atrito (μ)	Perda de massa (g)	Coeficiente de desgaste (K)	Superfície do pino	Superfície do disco
10	1,28	0,0020	0,00049	Manchas pretas	Região preta
25	1,10	0,0050	0,00050	Manchas pretas	Região preta
40	1,06	0,0180	0,00111	Manchas pretas	Região preta
50	1,03	0,0359	0,00177	Manchas pretas	Região amarela
60	0,95	0,0502	0,00207	Superfície lisa	Região amarela
75	0,90	0,0502	0,00165	Superfície lisa	Região amarela
100	0,87	0,0858	0,00212	Superfície lisa	Região amarela
125	0,88	0,1121	0,00221	Superfície lisa	Região amarela
140	0,89	0,1214	0,00214	Superfície lisa	Região amarela

Analogamente às observações do comportamento do latão 270, o latão 260 apresentou a mesma variação de regime, porém ocorreu com entre as cargas de 25 e 50 Newtons. Não obstante, nota-se que a região escura da superfície dos pinos estendeu-se até a carga de 50 Newtons, evidenciando que a transição de mecanismo de desgaste não é imediata.

Cruzando todas as informações, foi possível criar dois gráficos representados na Figura 56, que mostra a variação do coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal entre os latões 270 e 260.

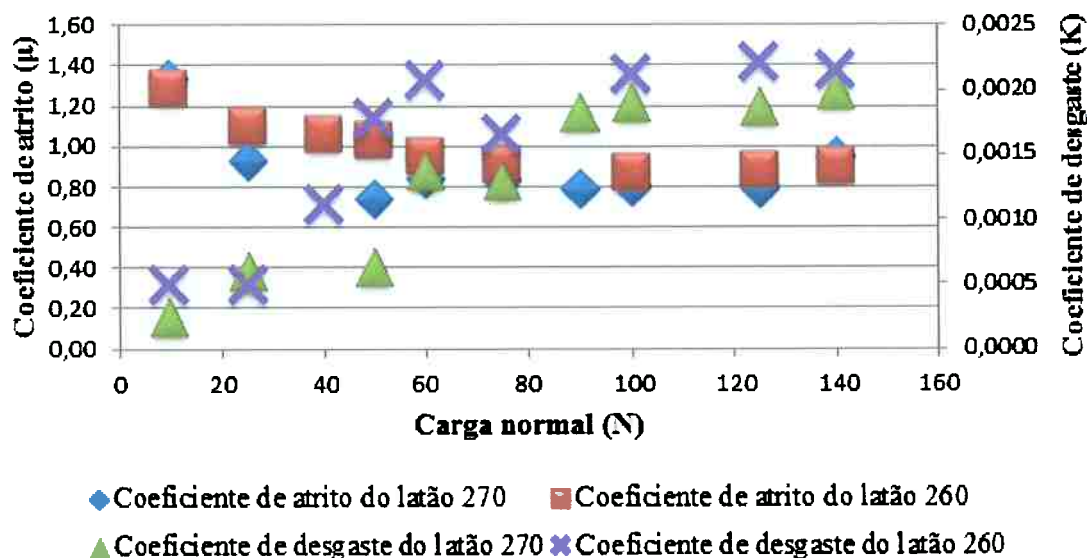


Figura 56 - Coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal do latão 270 e do latão 260.

Pode-se observar que existe uma relação entre o coeficiente de atrito e de desgaste. Nos dois casos, o coeficiente de desgaste aumenta quase que inversamente proporcionalmente ao coeficiente de atrito. Segundo Hutchings (Hutchings, 1992) os mecanismos de desgaste são concorrentes e no caso do deslizamento de latão em aço há a tendência de criação de camada de óxido até o momento em que a carga normal é suficiente para quebra-la e gerar contato Metal X Metal.

Intuitivamente creditamos que o coeficiente de atrito na região oxidada é maior do que a interface metálica pura, possivelmente porque uma parte da energia é dissipada pela deformação do pino, já que foi notado uma região de alta deformação nas micrografias da seção transversal (Figura 53, Figura 54 e Figura 55) e houve a criação de “cauda” (Figura 39). Esta afirmação é fortalecida pela teoria, na qual as equações III e IV mostram exatamente esse fenômeno no comportamento da força e no coeficiente de atrito.

Nas superfícies dos discos, foram encontradas regiões pretas que foram comprovados serem regiões de óxidos pelo EDS, indicando que os mecanismos de desgaste para as baixas cargas normais foram de desgaste oxidativo, conforme foi constatado na revisão bibliografia do desgaste de pinos de latão α/β em aço (Hutchings, 1992). Nos discos atritados com maiores cargas normais, foram encontradas regiões com composições, acusadas pelo EDS, compatíveis com o metal matriz dos pinos de latão, indicando fortemente que houve desgaste por adesão.

A Tabela 8 mostra todas as informações até o momento apresentadas dos testes com pinos de cobre.

Tabela 8 - Coeficiente de atrito, perda de massa, coeficiente de desgaste (K) e características da superfície dos discos e pinos de cobre pela carga normal aplicada.

Carga Normal (N)	Coeficiente de atrito (μ)	Perda de massa (g)	Coeficiente de desgaste (K)	Superfície do pino	Superfície do disco
10	2,02	0,0049	0,00113	Região preta e outra lisa	Quase nenhuma alteração
25	1,13	0,0051	0,00047	Região preta e outra lisa	Região preta
50	1,35	0,0080	0,00037	Região preta e outra lisa	Região preta
75	1,14	0,0083	0,00026	Região preta e outra lisa	Região preta
100	1,33	0,0060	0,00014	Região preta e outra lisa	Região preta
125	1,37	0,0060	0,00011	Região preta e outra lisa	Região preta com faixa "polida" no centro
140	1,20	0,0139	0,00023	Região preta e outra lisa	Região preta

Os pinos de cobre não apresentaram variação de regime significativa. A morfologia da superfície de todos os pinos foram próximas. Além disso, como foi observado nos resultados de EDS, indicou a presença de oxigênio e ferro, sugerindo que houve transferência metálica do disco para o pino, o que indica mecanismo completamente diferente dos observados com os latões.

Analogamente ao realizado para os latões, a Figura 57 mostra a variação do coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal do cobre.

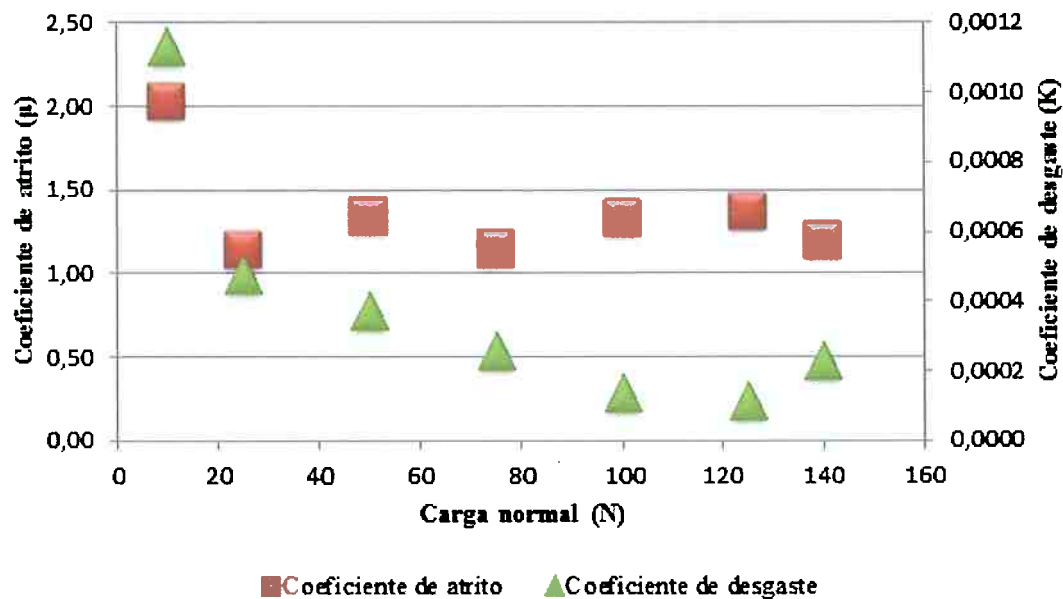


Figura 57 - Coeficiente de atrito e de desgaste pela carga normal do cobre.

Ao contrário do que ocorreu com os latões, os coeficientes de desgaste e atrito variaram praticamente diretamente proporcionais. Como foi mostrado, a superfície do pino atritado com carga normal de 10 Newtons (Figura 30) apresentou menor área de região escura, concomitantemente com o maior coeficiente de desgaste e atrito. Podemos atribuir este fato de que o atrito do par Fe-Cu apresenta condição limitada de compatibilidade segunda a Figura 13.

Além disso, como houve a perda de massa nos discos, principalmente em altas cargas, sugere que o pino chegou a desgastar o disco. Porém, a equação de Archard sugere que somente o material menos duro é desgastado pelo de maior dureza. Considerando esta informação, pode-se concluir que o atrito tenta deformar a superfície do pino de cobre, aumentando a densidade de discordâncias nas regiões próximas da superfície e a dureza, quanto mais próxima da região deformada.

Se comparado com a Figura 7, é possível notar que o comportamento do coeficiente de atrito do latão 270 e do cobre é bem parecido com o comportamento do gráfico esquerdo (a) que se mantém constante, exceto pelos dois primeiros pontos. Para o latão 260, o comportamento tem maior afinidade com o gráfico da direita (c) da Figura 7, onde há uma diminuição progressiva com o aumento da carga normal.

É plausível que se adote um valor constante característico, no qual o coeficiente de atrito médio encontrado para latão 270 é 0,89 e do cobre 1,36. Porém, o coeficiente de atrito (μ) varia fortemente para o latão 260, no qual é possível encontrar relação entre a carga normal aplicada (N), conforme é descrito a equação X:

$$\mu_{\text{Latão 260}} = 3 * 10^{-5} * N^2 - 0,007 * N + 1,1967 \quad (\text{Equação X})$$

Esta regressão possui $R^2=0,9179$, portanto representa bem a variação de coeficiente de atrito do latão 260.

Segundo a Figura 13, não mostra a relação do par Fe-Latão, somente os pares Fe-Cu e Fe-Zn. De acordo com os resultados do trabalho, não é razoável plotar que o desgaste da liga Cu-Zn será proporcional à relação indicada no gráfico de compatibilidade metalúrgica, tendo em vista que o latão 260 desgastou mais e possui teor de zinco intermediário.

Nas Figura 53 Figura 54, é possível identificar microestrutura na região não deformada pelo atrito as mesmas regiões descritas na Figura 18. Grãos alongados pela forte deformação de trefilação e regiões contendo “linhas” com direções próximas de 45° que podem ser as famosas maclas de deformação citado na (Figura 18).

7. Conclusão

Concluiu-se que o desgaste do latão 270 e 260 aumentaram positivamente conforme a carga normal, enquanto o desgaste do cobre permaneceu constante independentemente da carga aplicada. Além de que, o latão com menor teor de zinco (260) teve o regime de transição deslocado para menores cargas.

O coeficiente de desgaste do cobre foi aproximadamente uma ordem de grandeza menor do que os dos latões 270 e 260.

Foi possível encontrar relação inversamente proporcional entre o coeficiente de desgaste dos latões e o coeficiente de atrito, enquanto o cobre apresentou relação diretamente proporcional.

Os discos atritados pelos pinos do latão 270 aumentaram de massa, os atritados pelos pinos de latão 260 perderam massa em cargas baixas e os atritados pelos pinos de cobre perderam massa principalmente nas cargas de 75, 100 e 125 Newtons.

Foi constatado que quanto maior a carga normal e menor o teor de zinco no latão, maior o tempo de estabilização do atrito.

A força de atrito no cobre foi maior, principalmente nas maiores cargas, se estabilizando a partir da carga de 125 Newtons. Enquanto que o coeficiente de atrito de todos tendeu a ser mais alto com cargas menores e a se estabilizar. Não obstante, o coeficiente de atrito do cobre foi expressivamente maior do que dos latões 270 e 260.

O coeficiente de atrito médio encontrado foi de 0,89 para o latão 270 e 1,36 para o cobre. Para o latão 260 não é plausível de se considerar constante, mas sim em função da carga normal (N) aplicada, e pode ser calculada com a equação X:

$$\mu_{\text{Latão 260}} = 3 * 10^{-5} * N^2 - 0,007 * N + 1,1967$$

A superfície dos pinos com cargas menores que 75 Newtons para o latão 270 e 60 Newtons para o latão 260 apresentaram manchas pretas, que continham oxigênio, cobre e zinco. Acima destas cargas a superfície atritada expôs o metal matriz com ranhuras na direção de deslizamento. Não obstante, a superfície de todos os pinos de cobre apresentou mesmo padrão com mancha preta na região de “trás” do pino que continham oxigênio, ferro e cobre.

A superfície dos discos atritados pelo latão 270 apresentou coloração preta com cargas entre 10 e 50 Newtons (que continham oxigênio e cobre), coloração avermelhada

cargas entre 60 e 75 Newtons e coloração amarela cargas entre 90 e 140 Newtons (composição próxima do metal matriz de latão 270).

A superfície dos discos atritados pelos pinos de latão 260 apresentou coloração preta com cargas entre 10 e 40 Newtons (que continham oxigênio e cobre e zinco) e coloração amarela cargas entre 60 e 140 Newtons (composição próxima do metal matriz de latão 260).

A superfície dos discos atritados pelos pinos de cobre apresentou coloração preta com cargas entre 25 e 100 Newtons (que continham oxigênio, ferro e cobre) e coloração preta com faixa “limpa” em cargas de 125 Newtons.

Com a finalidade de obter o melhor material para anéis sincronizados de transmissão de automóveis, no qual deseja-se obter o material com maior coeficiente de atrito e menor desgaste, o cobre obteve melhores resultados do que as duas ligas de latão.

8. Bibliografia

ASM International. 2004. *ASM HandBook Metallography and Microstructures Volume 9.* United States of America : ASM International, 2004.

Bayer, R. G. 1994. *Mechanical wear prediction and prevention.* New York : M. Dekker, 1994.

Belyi, V. A., Ludema, K. S. e Myshkin, N. K. 1993. *Tribology in the USA and the former Soviet Union: Studies and Applications.* Moscow : Mashinostroenie, 1993.

Bhushan, Bharat. 2002. *Introduction to Tribology.* New York : John Wiley & Sons, Inc, 2002.

Blau, Peter J. 1995. *Friction Science and Technology.* New York : Marcel Dekker, Inc., 1995.

Davim, J. Paulo. 1999. *An experimental study of the tribological behaviour of the brass/steel pair.* Aveiro : Journal of Materials Processing Technology, 1999.

Gupta, B. K. e Bhushan, Bharat. 1991. *Handbook of Tribology: Materials, Coatings and Surface Treatments.* New York : McGraw-Hill, 1991.

Hutchings, I. M. 1992. *Friction and Wear of Engineering Materials.* Londres : Heinemann, 1992.

Rabinowicz, Ernest. 1965. *Friction and Wear of Materials.* Massachusetts : John Wiley & Sons, 1965.

Sena, Carlos H. C. 2008. *Projeto e Construção de uma Bancada de Testes de Atrito e Desgaste para Anéis Sincronizadores de Transmissões Automotivas.* São Paulo : USP, 2008.

SISDELLI, A. 2006. *Estudo de desgastes de rodas e suas consequências no material rodante e na via permanente.* Rio de Janeiro : IME, 2006.

Spencer , Nicholas D., et al. 2013. *Surfaces, Interfaces, and their Applications.* Zurich : ETH Zurich, 2013.

Stachowiak, Gwidon W. e Batchelor, Andrew W. 2005. *Engineering Tribology.* Burlington : Elsevier Inc., 2005.

Willians, J. A. 1994. *Engineering Tribology.* New York : Oxford University Press, 1994.

Anexo I

Massas dos discos e pinos de latão 270 antes e após os testes pino-disco e a variação de massa de todos os ensaios realizados.

Ensaio	Carga	Massa inicial do pino	Massa final do pino	Massa inicial do disco	Massa final do disco	Variação de massa no pino	Variação de massa no disco
	N	g	g	g	g	g	g
A20	10	55,0296	55,0290	126,2783	126,2802	0,0006	0,0019
A21	10	55,0439	55,0428	126,3444	126,3445	0,0011	0,0001
A24	10	55,5005	55,4992	126,6753	126,6775	0,0013	0,0022
A6	25	55,1257	55,1199	126,5096	126,5145	0,0058	0,0049
A22	25	55,0880	55,0798	126,2810	126,2813	0,0082	0,0003
A23	25	55,0655	55,0615	126,3445	126,3458	0,0040	0,0013
A1	50	55,0723	55,0641	126,2536	126,2558	0,0082	0,0022
A16	50	55,1781	55,1577	126,1626	126,1620	0,0204	-0,0006
A2	50	55,0855	55,0758	126,2536	126,2558	0,0098	0,0022
A7	60	54,8783	54,8559	126,3377	126,3407	0,0224	0,0030
A9	60	55,2649	55,2267	126,6077	126,6080	0,0382	0,0003
A10	60	55,1942	55,1541	126,6057	126,6072	0,0401	0,0015
A4	75	55,1676	55,1233	126,1850	126,1868	0,0443	0,0018
A12	75	55,0313	55,0059	126,3550	126,3558	0,0254	0,0008
A25	75	54,6634	54,6144	126,6765	126,6795	0,0490	0,0030
A8	90	55,0787	55,0000	126,3402	126,3425	0,0787	0,0023
A14	90	54,6627	54,5922	126,7642	126,7690	0,0705	0,0048
A15	90	55,6880	55,6370	126,1599	126,1604	0,0510	0,0005
A3	100	55,1417	55,0628	126,1810	126,1831	0,0789	0,0021
A13	100	55,1176	55,0555	126,7676	126,7657	0,0621	-0,0019
A26	100	54,3048	54,2142	126,3641	126,3666	0,0906	0,0025
A5	125	55,0658	54,9771	126,5073	126,5124	0,0887	0,0051
A19	125	54,7172	54,6214	126,3616	126,3629	0,0958	0,0013
A27	125	54,3838	54,2838	126,4465	126,4504	0,1000	0,0039
Ae1	140	53,9296	53,8121	126,1818	126,1835	0,1175	0,0017
Ae2	140	54,2449	54,1300	126,3483	126,3459	0,1149	-0,0024
Ae3	140	54,2855	54,1796	126,3521	126,3557	0,1059	0,0036

Anexo II

Massas dos discos e pinos de latão 260 antes e após os testes pino-disco e a variação de massa de todos os ensaios realizados.

Ensaio	Carga	Massa inicial do pino	Massa final do pino	Massa inicial do disco	Massa final do disco	Variação de massa no pino	Variação de massa no disco
	N	g	g	g	g	g	g
B9	10	54,3622	54,3608	126,2298	126,2289	0,0014	-0,0009
B15	10	54,3813	54,3781	126,5131	126,5123	0,0032	-0,0008
B22	10	54,1660	54,1646	124,2216	124,2215	0,0014	-0,0001
B6	25	54,3310	54,3254	126,0876	126,0874	0,0056	-0,0002
B8	25	54,3886	54,3858	126,2311	126,2292	0,0028	-0,0019
B28	25	53,8178	53,8111	123,7969	123,7968	0,0067	-0,0001
B11	40	54,0849	54,0704	126,4080	126,4095	0,0145	0,0015
B12	40	54,3698	54,3443	126,2496	126,2505	0,0255	0,0009
B16	40	54,3276	54,3135	126,8806	126,8800	0,0141	-0,0006
B1	50	54,1666	54,1131	126,4520	126,4501	0,0535	-0,0019
B10	50	54,3684	54,3546	126,4092	126,4097	0,0138	0,0005
B17	50	54,4072	54,3668	126,8810	126,8812	0,0404	0,0002
B18	60	54,1363	54,1108	126,5506	126,5527	0,0255	0,0021
B19	60	54,3833	54,3271	126,5524	126,5537	0,0562	0,0013
B25	60	54,9305	54,8615	122,8923	122,8937	0,0690	0,0014
B3	75	54,3622	54,2830	126,1378	126,1401	0,0792	0,0023
B4	75	54,4947	54,4286	126,1361	126,1376	0,0661	0,0015
B21	75	54,8643	54,8010	123,0727	123,0740	0,0633	0,0013
B2	100	54,6982	54,6065	126,1748	126,1776	0,0917	0,0028
B5	100	54,4194	54,3298	126,0856	126,0883	0,0896	0,0027
B29	100	55,5002	55,424	122,2601	122,261	0,0762	0,0009
B7	125	54,3343	54,2127	126,1977	126,1998	0,1216	0,0021
B14	125	54,3940	54,2750	126,5102	126,5131	0,1190	0,0029
B27	125	56,4508	56,3552	122,8923	122,8937	0,0956	0,0014
B13	140	54,9166	54,7835	126,2495	126,2514	0,1331	0,0019
B20	140	54,4181	54,3082	124,0126	124,0136	0,1099	0,0010
B24	140	54,8484	54,7271	122,8379	122,8413	0,1213	0,0034

Anexo III

Massas dos discos e pinos de cobre antes e após os testes pino-disco e a variação de massa de todos os ensaios realizados.

Ensaio	Carga	Massa inicial do pino	Massa final do pino	Massa inicial do disco	Massa final do disco	Variação de massa no pino	Variação de massa no disco
	N	g	g	g	g	g	g
C1	10	54,5075	54,5013	124,1033	124,1035	0,0062	0,0002
C9	10	54,0504	54,0427	170,6882	170,6878	0,0077	-0,0004
C17	10	54,0345	54,0338	169,9738	169,9724	0,0007	-0,0014
C2	25	54,4414	54,4340	124,1030	124,1035	0,0074	0,0005
C10	25	54,4540	54,4475	170,6882	170,6878	0,0065	0,0018
C18	25	54,1052	54,1038	170,7446	170,7423	0,0014	-0,0023
C3	50	55,1791	55,1690	124,1030	124,1027	0,0101	-0,0003
C11	50	54,6499	54,6404	122,7016	122,7022	0,0095	0,0006
C19	50	54,0488	54,0443	169,9738	169,9776	0,0045	0,0038
C4	75	55,0872	55,0856	122,7018	122,7028	0,0016	0,0010
C12	75	54,5025	54,4826	122,7025	122,7021	0,0199	-0,0004
C20	75	54,4488	54,4454	170,7446	170,7451	0,0034	0,0005
C5	100	54,5018	54,4913	122,6950	122,6999	0,0105	0,0049
C13	100	54,8456	54,8413	170,6824	170,6806	0,0043	-0,0018
C22	100	54,2550	54,2518	171,3568	171,3484	0,0032	-0,0084
C7	125	54,2692	54,2636	122,8512	122,8490	0,0056	-0,0022
C14	125	54,0090	53,9954	170,2146	170,2157	0,0136	0,0011
C23	125	54,2355	54,2314	170,3288	170,3225	0,0041	-0,0063
C8	140	54,1709	54,1555	122,8490	122,8523	0,0154	0,0033
C15	140	54,1976	54,1808	170,2115	170,2149	0,0168	0,0034
C24	140	56,0942	56,0846	170,3307	170,3327	0,0096	0,0020