



## ESTUDO DA CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL E DO DESGASTE POR DESLIZAMENTO ENTRE AS LIGAS DE BRONZE SAE 67 E SAE 841

Wellison Rodrigues da Cruz<sup>1</sup>

Fabio Peruch<sup>2</sup>

**Resumo:** As ligas de cobre podem ser encontradas como produtos trabalhados mecanicamente laminados, trefilados, extrudados, fundidos e metalurgia do pó. As numerosas ligas de cobre são utilizadas na maioria das vezes em consequência da sua variedade de propriedades. O bronze é a mais importante das ligas de cobre por sua notável resistência ao atrito, esta condição lhe confere especial valor industrial. A definição mais elementar de desgaste é a perda de material de uma ou de ambas as superfícies de contato quando submetidas ao movimento relativo. O coeficiente de atrito aponta resistência relativa ao deslizamento entre pares, não é medido diretamente, mas determinado pela força de atrito e calculado em função da força normal. Portanto, sofre influência dos materiais em contato, do acabamento superficial e de qualquer lubrificante ou película entre as superfícies de contato durante o teste. Neste trabalho foram realizados ensaios microestruturais e de desgaste pino sobre disco em amostras de bronze SAE 67 e SAE 841. Os ensaios de desgaste foram realizados utilizando um tribômetro rotativo, seguindo os parâmetros de acordo com a norma ASTM G99. Foram realizadas variações nos raios de deslizamentos e material da esfera do pino. As esferas utilizadas foram aço inox, CR 52100 e metal duro. Os resultados dos ensaios de desgaste confirmam que os valores do coeficiente de atrito são dependentes do tempo de ensaio, e que o coeficiente de atrito do bronze SAE 67 é superior ao bronze SAE 841 em torno de 50 %, porém ao final do ensaio percebeu-se que a perda de massa do bronze SAE 841 foi superior ao SAE 67, em função da sua microestrutura composta de porosidade, facilitando a remoção do material por arrancamento.

**Palavras-chave:** Bronze; SAE 67; SAE 841; Desgaste por deslizamento; Ensaio pino sobre disco.

### 1 INTRODUÇÃO

A metalurgia do pó é um processo de fabricação que produz peças tendo como matéria-prima pó metálico. O processo consiste em compactar e modelar a mistura e aquecê-la (etapa chamada de sinterização), com o objetivo de melhorar a coesão da estrutura interna. A característica específica do processo é que a

---

<sup>1</sup> Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade Satc. E-mail: [contato@fundicaoarte.com.br](mailto:contato@fundicaoarte.com.br)

<sup>2</sup> Professor Faculdade Satc. E-mail: [fabio.peruch@satc.edu.br](mailto:fabio.peruch@satc.edu.br)



temperatura permanece abaixo da temperatura de fusão do elemento constituinte principal (MORO; AURAS, 2007).

O processo de fundição consiste no vazamento de ligas líquidas de metais ferrosos ou não ferrosos em cavidades de recipientes denominados moldes, nos formatos desejados, deixando o material solidificar por resfriamento. Desta forma, peças simples ou complexas são produzidas a partir de qualquer metal que possa ser fundido (SIEGEL, 1975).

Dentro deste contexto, a garantia por materiais com alta resistência e baixo custo tem se tornado o principal objetivo das empresas em seu processo de fabricação.

As ligas de cobre podem ser encontradas como produtos trabalhados mecanicamente, laminados, trefilados, extrudados, fundidos e metalurgia do pó. O bronze grafitado, classificado pela norma SAE 841, é um material produzido através do processo de metalurgia do pó por apresentar elementos de liga que necessitam de alto ponto de fusão, como o grafite na faixa de 3700 °C. Este processo de fabricação, por apresentar maior complexidade e ser diferenciado, apresenta comercialmente um custo até três vezes maior do que os materiais fabricados pelo processo de fundição como o bronze SAE 67.

O estudo do presente trabalho será realizado a fim de verificar as características microestruturais e tribológicas entre o bronze SAE 841 (Grafitado) e o bronze SAE 67, comercialmente utilizados pela indústria metal mecânica em mancais auto lubrificantes e buchas deslizantes. Tendo em vista abordar uma relação de afinidade entre os dois materiais, através de ensaios destrutíveis de metalografia, microdureza e resistência ao desgaste para avaliar o coeficiente de atrito e a perda de massa entre os materiais estudados.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão bibliográfica abordada neste trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar os conceitos fundamentais do bronze e de suas características em relação à composição e propriedades mecânicas. Sendo assim foi muito importante o estudo do diagrama de fase cobre-estanho e as microestruturas resultantes deste material.



## 2.1 BRONZES

Os bronzes são ligas de cobre e estanho, cujas proporções variam conforme a aplicação em vista. Nas ligas de bronze, podem entrar outros tipos de metais como chumbo, alumínio, silício, manganês, níquel, ferro, fosforo, antimônio, etc. destinados a modificarem a sua dureza, sua cor, a tenacidade, a flexibilidade e a resistência ao atrito. O bronze é a mais importante das ligas de cobre por sua notável resistência ao atrito, esta condição lhe confere especial valor industrial. Estas ligas são excelentes materiais para moldagem e apresentam ponto de fusão em torno de 900 °C são bons condutores elétricos e trabalham em elevadas temperaturas. Suas aplicações estão ligadas a buchas deslizantes, anéis, engrenagens, mancais de rolamento e elementos rodantes (YOSHIDA, 1980). O Qd. 1 apresenta os principais grupos das ligas de bronze segundo as suas composições químicas.

Quadro 1: Composição química dos grupos dos bronzes

Família	Norma	Composição Química (%)						
	SAE	Cu	Sn	Pb	Zn	Mn	Fe	Al
Vermelho	40	85,0	5,0	5,0	5,0	-	-	-
Amarelo	41	67,0	1,0	3,0	29,0	-	-	-
Manganês	43	58,0	5,0	-	40,0	0,5	-	-
Estanho	62	88,0	10,0	0,3	2,0	-	-	-
Chumbo	63	88,0	10,0	2,0	0,7	-	-	-
Alto Chumbo	64	80,0	10,0	10,0	-	0,7	-	-
Alumínio	68 <sup>a</sup>	88,0	-	-	-	-	3,0	9,0

Fonte: National bronze (2015)

Segundo Gomes (1987), os bronzes comumente utilizados podem ser classificados em diversas ligas com os teores de estanho variando de 2 a 10 % para as ligas dúcteis e geralmente de 5 a 11 % no caso de ligas para a fundição. Contendo até aproximadamente 8 % de estanho, as ligas podem ser trabalhadas a frio para atingir alta dureza e maior limite de escoamento. À medida que cresce o teor de estanho, até 15 %, aumenta a resistência mecânica da liga, por outro lado, a ductilidade começa a cair a partir de 5 %. As propriedades mecânicas podem ser melhoradas com a adição de até 0,4 % de fósforo atuando como desoxidante e dando origem ao chamado bronze fosforoso.

A microestrutura do bronze que contém até entre 8 e 16 % de estanho, dependendo das condições de resfriamento, é monofásica fase alfa, e assim constituída por uma solução sólida de estanho em cobre. Acima desses teores inicia-se a precipitação de uma fase intermetálica, denominada delta, a qual é rica em estanho e possui dureza elevada. A associação desta fase delta com uma matriz alfa dúctil resulta em um material com excelentes propriedades antifricção, o qual é muito usado para a fabricação de mancais (GOMES, 1987). A Fig. 1 mostra o diagrama de fase da liga de cobre-estanho.

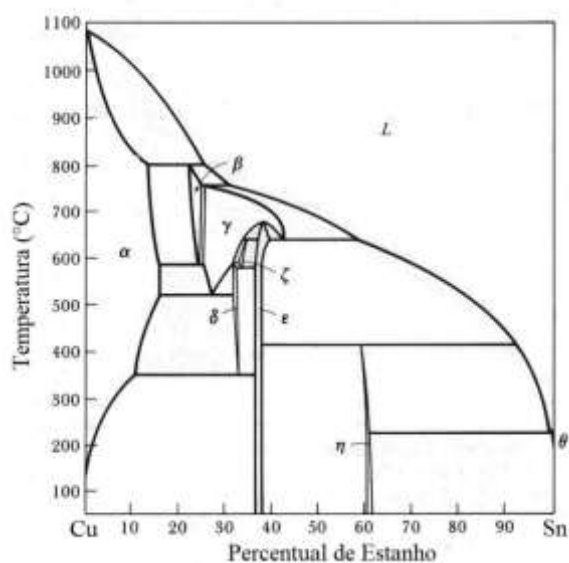


Figura 1: Diagrama de fase cobre x estanho  
Fonte: Callister (2007)

As ligas de bronze são frequentemente usadas na condição fundida, sem tratamento térmico subsequente, de modo que as propriedades iniciais dependem do desenvolvimento da fase delta durante o processo de solidificação, sendo assim, as propriedades obtidas resultam unicamente das condições do processo de fundição. O fator principal é o tamanho do grão de fase alfa primária e a distribuição da fase delta na microestrutura da liga (HANDBOOK, 1988).

O efeito do estanho em materiais à base de cobre é muito importante, pois proporciona ao material elevada resistência ao desgaste. As propriedades de atrito e dureza podem ser melhoradas pela adição de estanho na liga de cobre. O bronze com (90 % de cobre e 10 % de estanho) constituída geralmente de uma única fase conhecida como fase alfa composta por (cobre + estanho), é o material de deslizamento muito apropriado, para condições de corrosão, altas temperaturas e



altas cargas (CALLISTER, 2007). O Qd. 2 mostra as propriedades mecânicas das ligas de bronze.

Quadro 2: Propriedades mecânicas dos grupos de bronzes

SAE	Limite de Resistência MPa	Limite de Escoamento MPa	Alongamento %	Dureza (HB)
40	250	115	30	50-65
41	230	82	35	40-60
43	480	190	30	130
62	310	150	25	75
63	285	145	20	77
64	240	120	20	55-70
68A	550	185	35	110-140

Fonte: National Bronze (2015)

### 2.1.1 Bronze SAE 841 (grafitado)

Segundo Ghorbani et al. (2004), revestimentos compósitos podem fornecer várias propriedades aos materiais, tais como a resistência ao desgaste, auto lubrificação e resistência à oxidação. Os materiais auto lubrificantes são usados para a produção de materiais de deslizamento, mancais auto lubrificantes, buchas deslizantes e geralmente considerados para uso onde graxa e óleo lubrificantes não pode ser utilizado. Vários tipos desses materiais, tais como grafite, MoS<sub>2</sub> (bissulfeto de molibdênio), talco, mica e CaF<sub>2</sub> (Fluoreto de cálcio) são utilizados como auto lubrificantes com uma matriz de metal, tal como níquel ou cobre e suas ligas. Materiais antifricção compostos de cobre com grafite são amplamente utilizados como auto lubrificante devido ao seu baixo coeficiente de atrito.

O comportamento de desgaste, atrito e dureza são dependentes do volume de grafite, com o aumento do percentual de grafite, o coeficiente de atrito diminui e a perda de peso por desgaste e a dureza aumentam. O bronze grafitado tem como revestimento compósito o grafite tornando-o permanentemente lubrificado (GHORBANI et al. 2004).

Sinterização é a fase final do ciclo de consolidação dos pós-metálicos, iniciado pela compactação. Essa fase consiste no aquecimento do compactado na ordem de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão da liga, ocasionando tipicamente a difusão no estado sólido. Dependendo da temperatura de utilização do forno faz-se necessário



o uso de atmosfera protetora, cuja função é minimizar qualquer reação química entre o compactado verde, sendo a mais importante destas a oxidação (CHIAVERINI, 1992).

Os mancais porosos de bronze são compactados e sinterizados para ter conectividade entre poros de 10 a 25%, a impregnação é feita por intermédio de vácuo. As buchas podem ser aplicadas a eixo sem tratamento de endurecimento em virtude de sua boa condutividade térmica, que proporciona bom funcionamento a altas velocidades. À medida que a porosidade decresce, a capacidade de carga aumenta. O contraponto é que, com a porosidade elevada, a quantidade de óleo nos poros é maior, proporcionando melhor lubrificação (HUTCHINGS, 1992).

A porosidade pode estar presente no pó ou fazer parte da estrutura da peça sinterizada. Na peça acabada existem dois tipos de porosidade, em um deles, os poros estão conectados. No outro, existem poros, porém eles não estão interligados entre si (CHIAVERINI, 1992).

A presença de poros em produtos limita a aplicação dos componentes para leve e médio esforço. Os poros atuam como concentradores de tensão e afetam as propriedades mecânicas, como o limite de resistência à fadiga de contato (DHANASEKARAN, 2007).

Compósitos sinterizados de bronze-grafite são amplamente utilizados em mancais deslizantes e em aplicações em buchas por conta de sua condutividade de calor, sua resistência ao desgaste e seu baixo atrito (MUTERLLE, 2011).

Segundo Muterlle (2011), os lubrificantes sólidos são escolhidos para a produção de materiais de mancais e, em geral, considerados quando graxas e lubrificantes líquidos não podem ser usados. O grafite é um dos lubrificantes mais comuns. Sua estrutura é um hexagonal lamelar, com ligação de Van Der Waals entre átomos de C (Carbono), que torna fácil a ruptura ao longo do plano basal da estrutura cristalina. O efeito do grafite depende do ambiente e da temperatura. O Qd. 3 apresenta as propriedades mecânicas do bronze grafitado segundo a norma SAE 841.

Quadro 3: Propriedades mecânicas do bronze SAE 841

Limite de Resistência	96 MPa
Limite de Escoamento	75 MPa
Alongamento	1%

Fonte: National Bronze (2015)



### 2.1.2 Bronze ao chumbo – SAE 67

O chumbo é adicionado ao bronze para melhorar as propriedades antifricção, usinabilidade e estanqueidade de peças fundidas, e o zinco para atuar como desoxidante e melhorar a resistência mecânica (SIEGEL, 1975).

Quando adicionado chumbo à composição do bronze a liga apresenta redução no desgaste por conta da formação de uma camada de chumbo oxidado de cerca de 15 mm de espessura, a qual cobre a faixa de desgaste. Quando não há formação do filme, a perda de material no chumbo-bronze é mais severa em relação ao bronze sem chumbo. A formação da camada de chumbo e o comportamento de desgaste do bronze dependem do efeito combinado da microestrutura e da rugosidade da superfície (MISCHLER et al. 2011).

De acordo com Coronado (2007), o bronze SAE 67 apresenta aglomerados de chumbo distribuídos em sua matriz, que consiste de uma solução sólida de cobre e estanho. O chumbo é um material macio, por conseguinte, entre uma porcentagem maior de chumbo e menor de estanho, apresenta-se menor dureza. O chumbo é um material lubrificante sólido e uma de suas características é diminuir o coeficiente de atrito dos materiais em contato.

Segundo Rivas et al. (2006), nas usinas de cana de Açúcar da Colômbia as ligas de bronze mais utilizadas são os bronzes alto chumbo SAE 67 e SAE 64, porque eles têm capacidade de trabalhar com altas cargas, alta resistência a fadiga e capacidade de trabalhar em elevadas temperaturas. Além disso, o aumento do teor de chumbo tem a capacidade de atuar como lubrificante, reduzir à resistência a fadiga e tornar as ligas de bronze suscetíveis a corrosão. O Qd. 4 apresenta as propriedades mecânicas do bronze segundo a norma SAE 67.

Tabela 4: Propriedades mecânicas conforme a norma SAE 67

Limite de Resistência	280 MPa
Limite de Escoamento	135 MPa
Alongamento	10%
Dureza	50-60HB

Fonte: National Bronze (2015)



## 2.2 DESGASTE POR DESLIZAMENTO

A tribologia é a ciência que estuda a interação de superfícies e seus assuntos relacionados, popularmente esta ciência é conhecida como lubrificação, desgaste e atrito, incluindo os estudos da interação física e química de componentes, distribuição de forças, conversão de energia e alteração de topografia (BHUSHAN, 2002).

A definição mais elementar de desgaste é a perda de material de uma ou de ambas as superfícies de contato quando submetidas ao movimento relativo (BATCHELOR et al. 2000).

A dificuldade na compreensão do fenômeno de desgaste ocorre por causa do grande número de variáveis. Considerações tribológicas incluem variáveis como condição da superfície, atrito e aspectos associados ao contato mecânico. As características inerentes do material formam outro grupo de variáveis, que inclui composição, liga, microestrutura e demais propriedades mecânicas dos materiais. O desgaste por deslizamento a seco, adesivo ou abrasivo, é uma consequência do grande número de variáveis impostas externamente e das características inerentes dos materiais em contato. Tem-se tentado modelar esse fenômeno com ênfase em valores mensuráveis, tais como carga, velocidade de deslizamento e distância, dureza inicial do material etc. (MECHANICAL ENGINEERING, 1996).

Segundo Rigney (1997), condições durante as fases iniciais de deslizamento são diferentes em relação a longos períodos. Na fase inicial, ou período de adaptação é difícil reproduzir um teste em função da sua sensibilidade a pequenas mudanças na geometria e da preparação da superfície. Após longos períodos de deslizamento, tendem a tornarem-se constantes o coeficiente de atrito médio, a magnitude das flutuações de atrito, a rugosidade da superfície e a profundidade da camada deformada.

O coeficiente de atrito aponta resistência relativa ao deslizamento entre pares. Não é medido diretamente, mas determinado pela força de atrito e calculado em função da força normal. Portanto, sofre influência dos materiais em contato, do acabamento superficial e de qualquer lubrificante ou película entre as superfícies de contato (OZSARAC et al. 2007).



Para os mancais que não possuem lubrificação por meio líquido, às vezes os materiais envolvidos são capazes de diminuir o desgaste. Algumas ligas que contêm chumbo sobressaem particularmente pelo baixo coeficiente de atrito. Isso porque têm fases que provêm filmes finos com baixa tensão de cisalhamento. Tanto o chumbo-bronze quanto o chumbo-cobre apresentam dispersantes metálicos de chumbo, os quais possuem muito baixa solubilidade na matriz. No deslizamento, um filme fino e fraco de chumbo é formado na superfície e resulta em um baixo valor do coeficiente de atrito no mecanismo de abrasão (HUTCHINGS, 1992).

### 2.2.1 Ensaio de desgaste pino sobre disco

Segundo Verdi (2011), a prática do ensaio pino sobre disco é aplicada para determinar o desgaste provocado pelo deslizamento de contatos com áreas reduzidas. A máquina ou dispositivo de teste consiste em rotacionar o disco ou fazer movimentos circulares com o pino para que haja um movimento discordante entre o pino e o disco. O resultado do ensaio é um risco circular no disco, a Fig. 2 ilustra o princípio básico do ensaio pino sobre disco e os integrantes deste sistema tribológico.

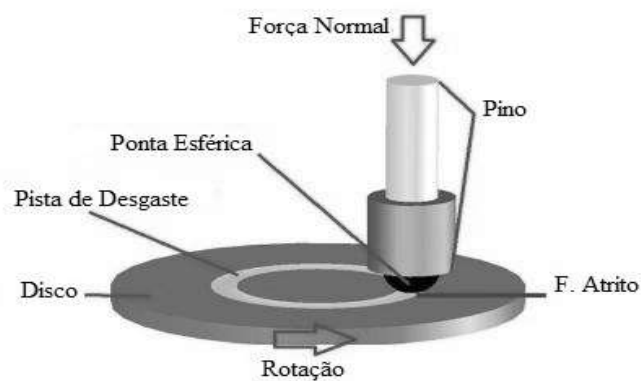


Figura 2: Representação esquemática do dispositivo Pino-Disco  
Fonte: Adaptado de Leite (2012)

Ainda de acordo com Verdi (2011), pode-se configurar o dispositivo tanto na horizontal quanto na vertical, contanto que o eixo do pino esteja perpendicular com a face do disco. Com carga pré-determinada, o pino é pressionado sobre o disco que está em movimento, sendo possível simular a carga utilizando dispositivos mecânicos, hidráulicos, pneumáticos e elétricos.

A determinação do desgaste é feita através da análise de perda de massa ou variação das medidas do disco e do pino realizadas antes e depois dos testes. A



quantidade de desgaste é resultado de uma combinação de fatores como força aplicada, velocidade de deslizamento, distância percorrida, o meio em que o teste é realizado e as propriedades dos materiais. As características dos sistemas reais como meio corrosivo, temperatura, lubrificação e geometria podem levar o teste a resultados distantes dos valores reais, logo deve-se avaliar o maior número possível de variáveis.

O coeficiente de atrito pode ser obtido com o uso de sensores, como por exemplo, uma célula de carga, de modo que seja possível medir a força resistente ao movimento, ou seja, a força de atrito. Conhecendo a força normal aplicada, é possível determinar o coeficiente de atrito como sendo a razão entre a força de atrito e a força normal (ASTM INTERNATIONAL, 2005).

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Após período de leitura e compreensão das revisões bibliográficas estudadas iniciou-se a definição de quais seriam os ensaios e experimentos a fim de gerar resultados confiáveis e assim se processasse a análise dos resultados e as suas respectivas conclusões, a Fig. 3 ilustra a sequência dos ensaios realizados neste trabalho.

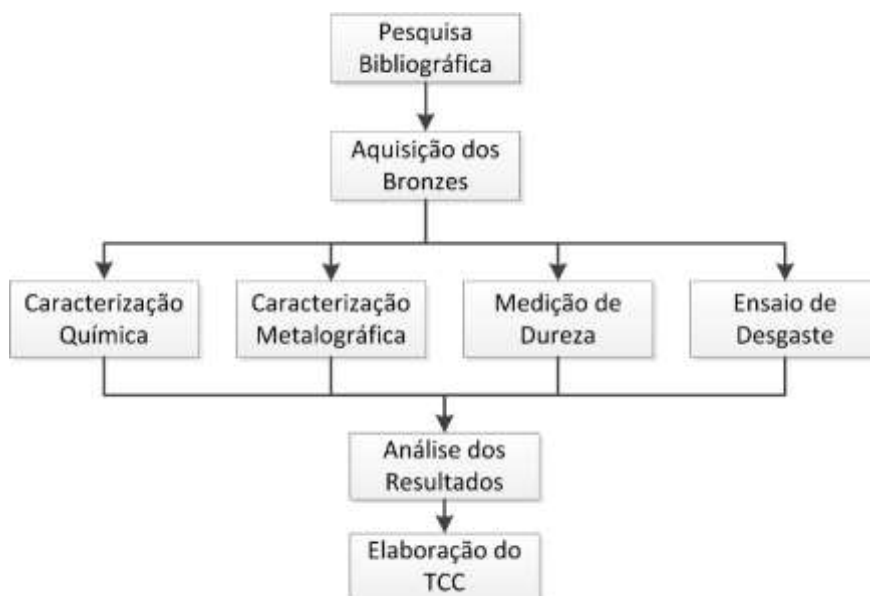


Figura 3: Fluxograma das etapas e metodologia realizados neste trabalho  
Fonte: Do autor



### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A barra de bronze SAE 841 fabricado pelo processo de metalurgia do pó com 42,00 mm de diâmetro foi adquirido junto à empresa DUBRONZE Indústria e Comércio de Aços e Metais LTDA localizada em São Paulo, o bronze SAE 67 com 60,00 mm de diâmetro foi fabricado na Fundição Bittencourt LTDA localizada no sul de Santa Catarina, o processo de fundição desta barra se deu por centrifugação.

#### 3.1.1 Medição da dureza e análise química

Os ensaios de microdureza foram realizados nas dependências do LACAMI – Laboratório de Caracterização microestrutural da Engenharia Mecânica Faculdade SATC, seguindo os parâmetros de acordo a norma ASTM E384.

Foi realizado um perfil de dureza nas amostras para se avaliar a variação de dureza ao longo da seção transversal das barras, as microdurezas foram determinadas pelo método vickers em um microdurômetro Shimadzu HMV- 2TADW acoplado ao aparelho estava instalado um software HMV-AD. Foram realizadas 10 endentações ao longo do raio da seção do diâmetro externo até o centro das amostras, com espaçamento de 1,0 mm cada, utilizando uma força de 1,961 N, com tempo de ensaio de 8 segundos.

A composição química das amostras estudadas foi determinada por espectrometria óptica, no laboratório de análise química da empresa Fundição Arte LTDA. Foi utilizado um espectrômetro Bruker, modelo Q2 ION.

#### 3.1.2 Caracterização microestrutural

A caracterização microestrutural das amostras foi realizada nas dependências do LACAMI – Laboratório de Caracterização Microestrutural da Engenharia Mecânica Faculdade SATC. As amostras foram seccionadas transversalmente, em seguida foram lixadas com granulometrias: 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh e polidas com pasta de alumina 0,3 µm, de acordo a norma ASTM E250. Para o ataque utilizou-se o método eletrolítico composto por uma fonte alimentadora de tensão, com saída positiva para amostra e saída negativa para o eletrodo. A tensão utilizada no ensaio foi de 0,06 volts, eletrodo de inox e o ácido Nital 2 %. Após o

ataque, foram realizadas as micrografias das amostras, utilizando o Microscópio Eletrônico Olympus BX51M e o Software AnalySIS GetIT. As amostras foram analisadas com ampliações de 50, 100, 200, 500 e 1000 vezes de aumento.

### 3.2 ENSAIO DE DESGASTE PINO SOBRE DISCO

Os ensaios de desgaste por atrito foram realizados nas dependências do LASPHI – Laboratório de Sistemas Pneumáticos e Hidráulicos da Faculdade SATC, seguindo os parâmetros de acordo com a norma ASTM G99, a máquina utilizada para a realização do ensaio foi um tribômetro rotativo conforme a Fig. 4.

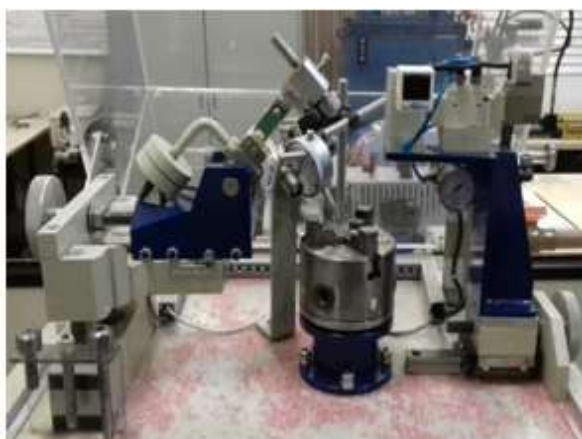


Figura 4: Imagem do tribômetro rotativo  
Fonte: Do autor

As amostras de bronze SAE 841 e SAE 67 ensaiadas tiveram uma espessura de 15,0 mm e diâmetros respectivos de 42,0 mm e 60,0 mm, a superfície da região a ser ensaiada foi preparada por lixamento com granulometrias de: 220, 320, 400, 600 e 1200 mesh, com objetivo de diminuir a rugosidade da superfície.

Os ensaios foram realizados sob uma carga de 20 N por um tempo de 30 minutos utilizando-se variações nos raios de deslizamento e material do pino de desgaste, as condições do ensaio pino sobre disco estão apresentadas no quadro 5. Para configuração dos dados de entrada e para as informações dos resultados do ensaio foram utilizados como auxílio o Software LabVIEW. Para a determinação da variação de massa foi utilizado uma balança de precisão (0,001 g) fabricante Marte modelo AD500.



Quadro 5: Informações utilizadas para o ensaio de desgaste

Material	Raio (mm)	Material da Esfera	Velocidade (RPM) (RPM)	Tempo (s)	Nº de Voltas
SAE 67	17	Aço Inox	300	1872	9362
	21	Metal Duro	245	1856	7578
	25	52100	205	1863	6366
SAE 841	15	Aço Inox	300	1872	10.601
	18	Metal Duro	245	1861	8841
	21	52100	205	1856	7578

Fonte: Do autor

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e as respectivas análises da caracterização química e metalográfica, medições de dureza e ensaios de desgaste dos bronzes estudados.

### 4.1 MEDIÇÃO DE DUREZA E ANÁLISE QUÍMICA

A Fig. 5 mostra o perfil de micro dureza Vickers encontrado nas amostras testadas, nela é possível perceber que não houve uma variação de dureza significativa entre a periferia e o centro da amostra, fator confirmado pela linha de tendência. Desta forma pode-se afirmar que em função dos resultados encontrados as propriedades relacionadas à resistência mecânica não serão alteradas em função da distância entre a periferia até o núcleo. Visto que não existe uma norma que classifique a dureza do bronze grafitado em função da grande quantidade de porosidade em sua microestrutura.

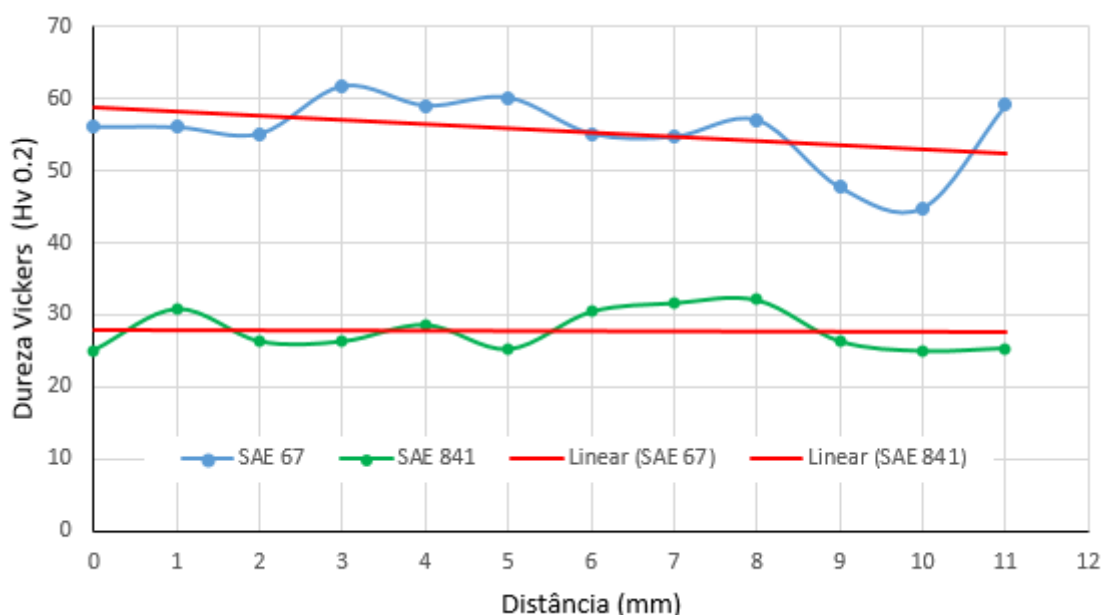


Figura 5: Perfil de dureza bronze SAE 67 e SAE 841.  
Fonte: Do autor

O Qd. 6 apresenta os resultados da composição química das amostras testadas nela é possível verificar que os materiais estão com suas composições químicas de acordo com as normas de referência.

Quadro 6: Resultado da análise química das amostras estudadas em (%) de massa.

Elementos	Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Ni	P	C
SAE 67	77,96	7,02	14,35	0,35	0,028	0,17	0,035	-
Norma SAE 67	75,0-79,0	6,3-7,5	13,0-16,0	0,8	0,15	0,8	0,05	-
SAE 841	87,6	10,45	0,63	0,95	-	-	-	0,95
Norma SAE 841	86,0-90,5	9,5-10,5	0,5-1,2	-	-	-	-	1,3

Fonte: Do autor

## 4.2 CARACTERIZAÇÃO MICROESTRUTURAL

Na imagem microscópica sem ataque do bronze SAE 67 mostrado na Fig. 6 percebe-se uma microestrutura composta por partículas globulares de chumbo (áreas escuras) distribuídas ao longo da matriz. A mesma imagem confirma a literatura, onde segundo Coronado (2007), o bronze SAE 67 apresenta aglomerados de chumbo distribuídos em sua matriz, que consiste de uma solução sólida de cobre e estanho.

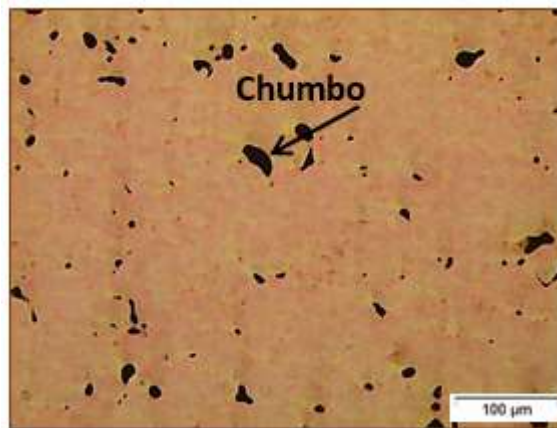


Figura 6: Microestrutura do bronze SAE 67 como fornecidos 200x, sem ataque  
Fonte: Do autor

Na condição com ataque como mostrado na Fig. 7 (a), pode-se ver uma estrutura de estado bruto de fusão em coquilha (molde metálico) com crescimento não uniforme dos grãos, ou seja, não homogênea em função da variação de tempo de solidificação. A mesma imagem revela a parte da periferia da amostra, onde se percebe que existe o refino da granulometria e uma quantidade maior da fase delta (áreas claras) e o chumbo no contorno de grão. Esta distribuição se dá pelo processo de fundição por centrifugação, onde a força centrífuga tenta a jogar os elementos com maiores densidades para a extremidade da peça.

Na Fig. 7 (b) com maior ampliação é mostrada uma microestrutura básica de um bronze com 90 % de cobre e 7 % de estanho constituído de uma matriz de solução sólida alfa ( $\alpha$ ) composta por (cobre + estanho), com contornos de eutetóide (solução alfa ( $\alpha$ ) e delta ( $\delta$ )), composta de duas fases, geralmente chamada de alfa ( $\alpha$ ) e delta ( $\delta$ ), e glóbulos de chumbo (Pb) nos contornos de grão.

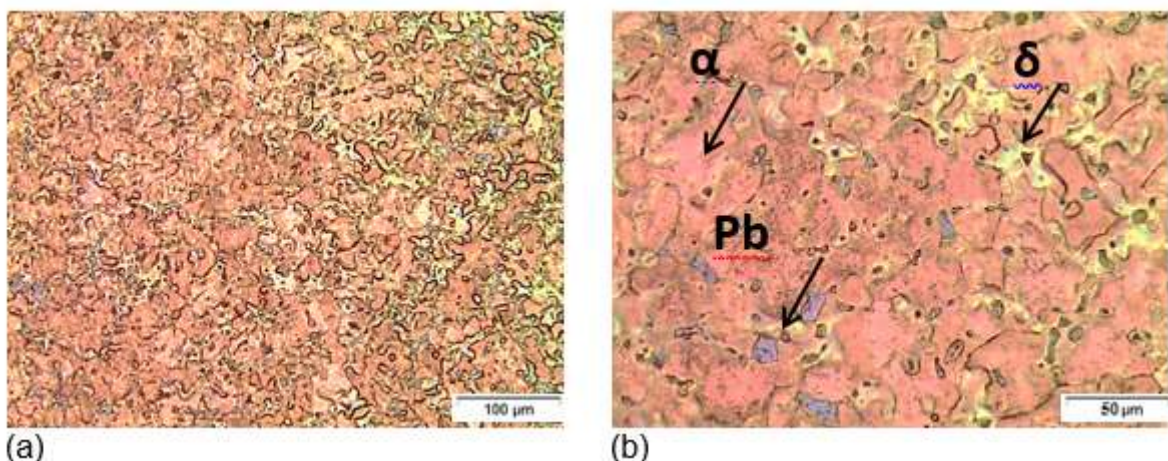


Figura 7: Microestrutura do Bronze SAE 67 (a) 200x (b) 500x. Com ataque, Nital 2 %  
Fonte: Do autor

Na Fig. 8 é mostrado uma microestrutura constituída de uma fase alfa, uma fase delta e o chumbo presente nos contornos de grão, a presença de porosidade foi observada em todas as amostras e esse fato remete à necessidade de monitorar melhor a etapa de fusão e durante a desoxidação, tendo atenção para umidade presente na carga de fusão e controle da temperatura e tempo de fusão.

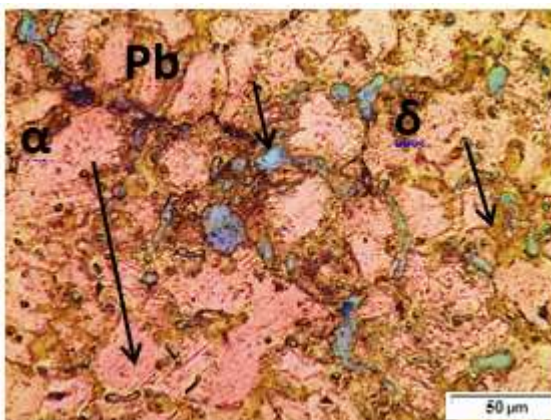


Figura 8: Microestrutura do Bronze SAE 67 500x. Com ataque, Nital 2 %.  
Fonte: Do autor

Na imagem microscópica sem ataque, mostrado na Fig. 9, pode-se ver que o bronze SAE 841 apresentou uma estrutura composta de uma fase metálica e uma grande quantidade de porosidade, possivelmente oriundas do processo de fabricação por sinterização (metalurgia do pó). A porosidade presente na amostra influencia nas propriedades mecânicas do material, reduzindo seus limites de resistência, porém proporcionando melhor lubrificação durante o trabalho em virtude dos vazios serem preenchidos com óleo durante operação.



Figura 9: Microestrutura do Bronze SAE 841 em estado fornecido 200x, sem ataque.  
Fonte: Do autor

Após o ataque, conforme a imagem microscópica mostrada na Fig. 10 (a) pode-se ver uma estrutura de estado bruto com crescimento não uniforme dos grãos,



ou seja, não homogênea. É possível perceber também através da Figura 10 (b) uma microestrutura básica de um bronze com 90% de cobre e 10% de estanho constituída de uma única fase geralmente chamada de alfa ( $\alpha$ ) composta por (cobre + estanho). A grande quantidade de porosidade já vista na imagem sem ataque continua sendo visível na amostra atacada. As imagens confirmam a literatura revelando que através da sinterização ocorre a difusão dos pós-metálicos.

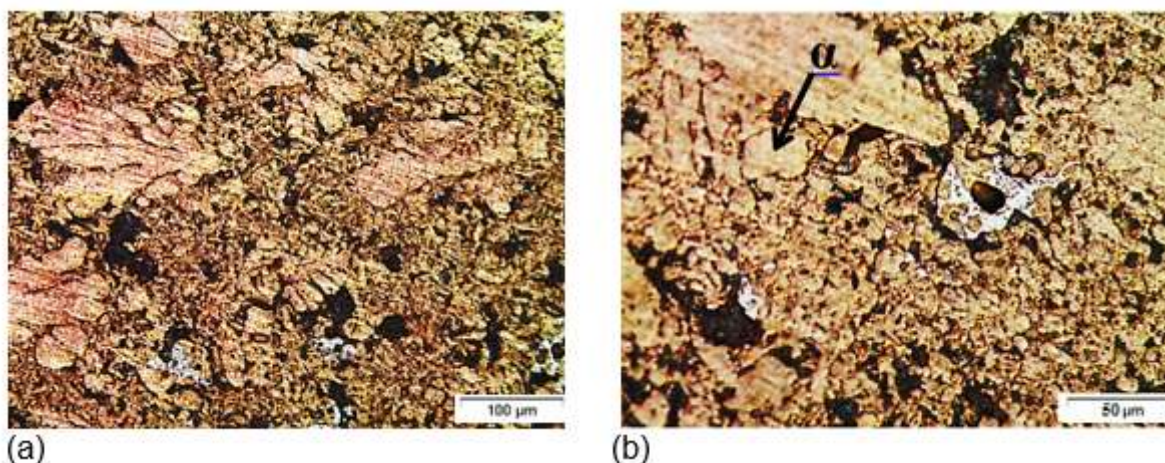


Figura 10: Microestrutura do Bronze SAE 841 (a) 200x (b) 500x. Com ataque, Nital 2 %.  
Fonte: Do autor

#### 4.3 ENSAIO DE DESGASTE

O gráfico da Fig. 11 apresenta os resultados da média dos coeficientes de atrito das 03 condições de esferas testadas para as amostras dos bronzes, o Bronze SAE 841 apresentou um coeficiente de atrito em torno de 50 % menor em relação ao SAE 67. Para o bronze SAE 841 o menor coeficiente de atrito para a condição a seco ocorreu para a esfera de aço inox, seguida pela esfera de CR 52100 e pela esfera de metal duro. Para o bronze SAE 67 o menor coeficiente de atrito foi apresentado para a esfera de CR 52100, seguida pela esfera de aço inox e pela esfera de metal duro. Não ficou evidenciado em função do desvio padrão e dos resultados encontrados que o material da esfera influenciou na redução ou aumento do coeficiente de atrito dos materiais testados.

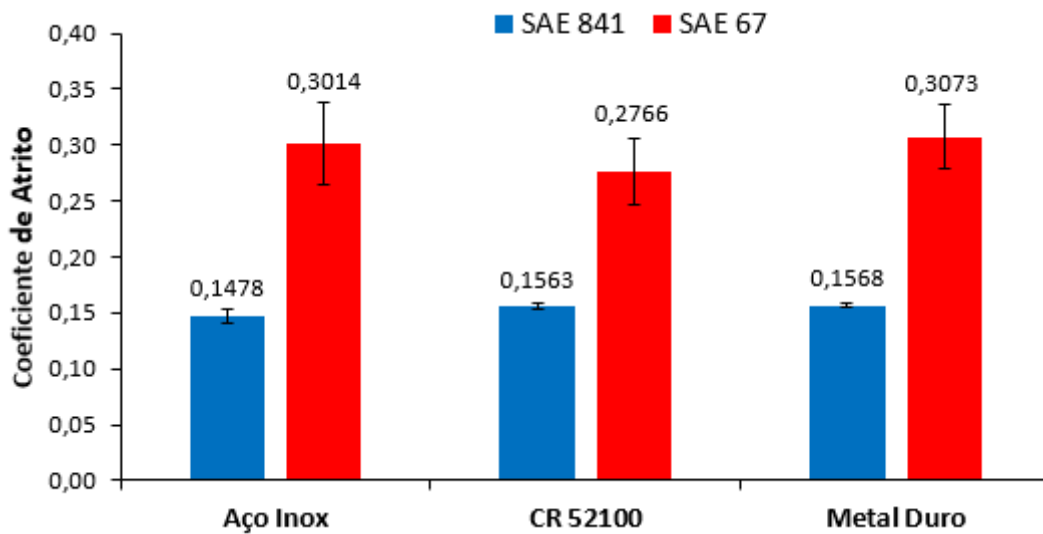


Figura 11: Média do coeficiente de atrito bronze SAE 67 e SAE 841  
Fonte: Do autor

O valor do coeficiente de atrito foi monitorado durante o ensaio como mostrado na Fig.12 para cada uma das três condições de esferas estudadas. Durante os ensaios, a amostra do bronze SAE 841 apresentou pouca variação do coeficiente de atrito em relação à amostra do bronze SAE 67.

Os resultados dos ensaios pino sobre disco confirmam que os valores do coeficiente de atrito são dependentes do tempo de ensaio. Condições durante as fases iniciais de deslizamento são diferentes, após longos períodos, tendem a tornarem-se constantes o coeficiente de atrito médio, a magnitude das flutuações de atrito, a rugosidade da superfície e a profundidade da camada deformada (Rigney, 1997).

A barra vertical mostrada na Fig. 12 indica aproximadamente o ponto de estabilização do coeficiente de atrito para o bronze SAE 841, nota-se que não houve variação para os três tipos de esferas e que a estabilização para esta condição foi aproximadamente a 20 m da distância percorrida a partir do início do ensaio. Essa pequena variação do coeficiente de atrito para o bronze SAE 841 está diretamente ligada à capacidade do material de se conformar ao contra o corpo e também ao percentual de grafite presente na sua microestrutura atuando como lubrificante.

As barras verticais mostradas na Fig. 13 indicam aproximadamente o ponto de estabilização do coeficiente de atrito do bronze SAE 67. Percebe-se que houve variação entre os três tipos de esferas. Para a esfera de metal duro e CR 52100 a estabilização do coeficiente de atrito manteve-se aproximadamente a partir dos 200 m da distância percorrida. Já para a esfera de aço inox foi possível verificar uma

grande variação do coeficiente de atrito entre os 350 m da distância percorrida e que a estabilização para esta condição foi aproximadamente a partir dos 380 m.

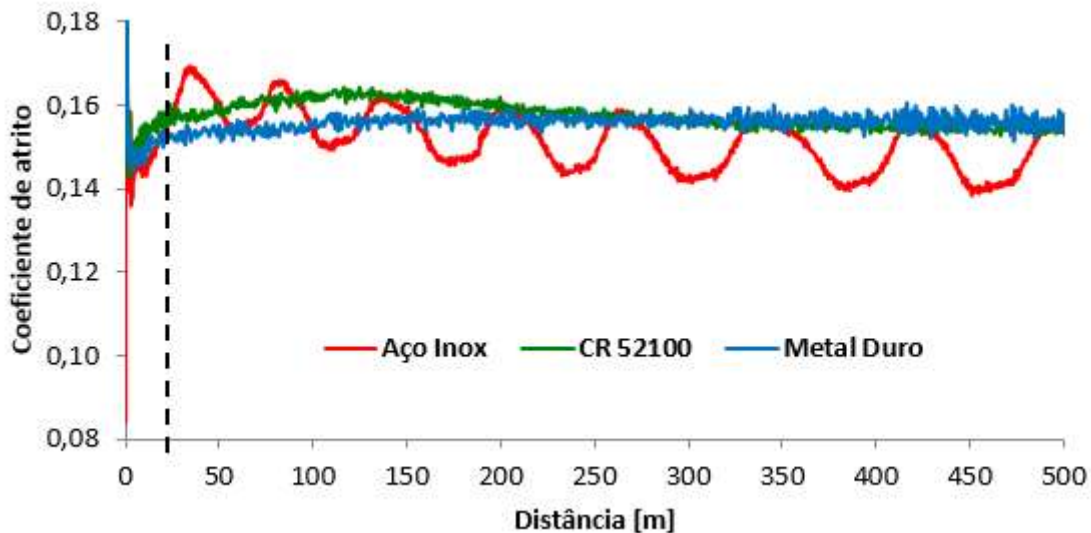


Figura 12: Estabilização do coeficiente de atrito durante os ensaios de desgaste por deslizamento em amostras do bronze SAE 841  
Fonte: Do autor

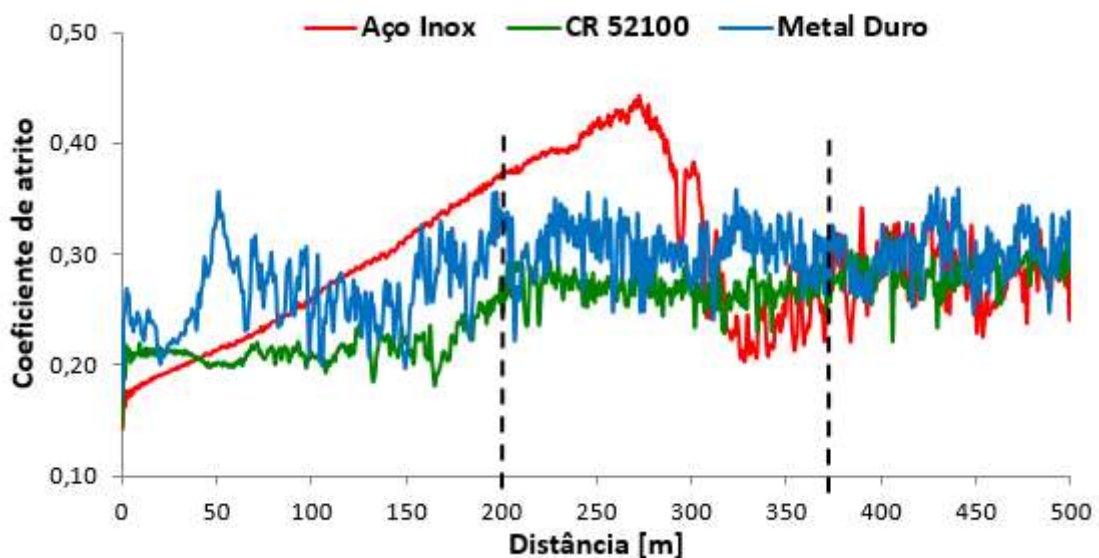


Figura 13: Estabilização do coeficiente de atrito durante os ensaios de desgaste por deslizamento em amostras do bronze SAE 67  
Fonte: Do autor

O resultado da perda de massa das amostras testadas após o tempo de 30 minutos foi muito pequeno como mostrado na Fig. 14, sendo assim foi realizado uma extrapolação de dados para um tempo de 300 horas de ensaio a fim de que se pudesse verificar uma perda de massa mais significativa. A Figura 15 apresenta os resultados de perda de massa com extrapolação de 300 horas, nela é possível



verificar que a perda de massa para o bronze SAE 67 foi de 11,4 % e para o SAE 841 aproximadamente 40,8 %. A maior perda de massa do SAE 841 se deve a um maior nível de porosidade em sua microestrutura, confirmando a alta fragilidade deste tipo de material. A presença de porosidade na microestrutura acaba facilitando a remoção de material por arranchamento e eliminando o ganho teórico de resistência ao desgaste para essa classe de materiais.

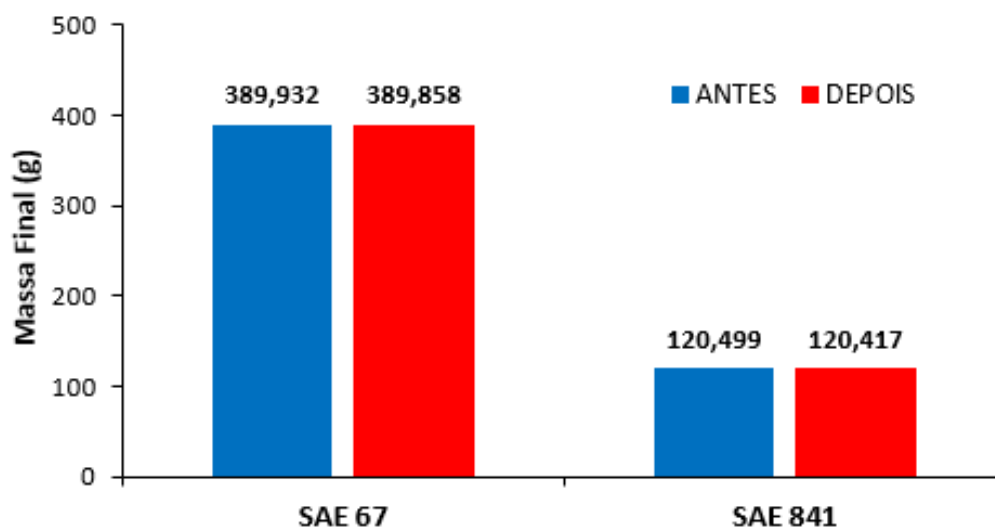


Figura 14: Perda de Massa das amostras de bronze SAE 67 e SAE 841 para um tempo de 30 minutos  
Fonte: Do autor

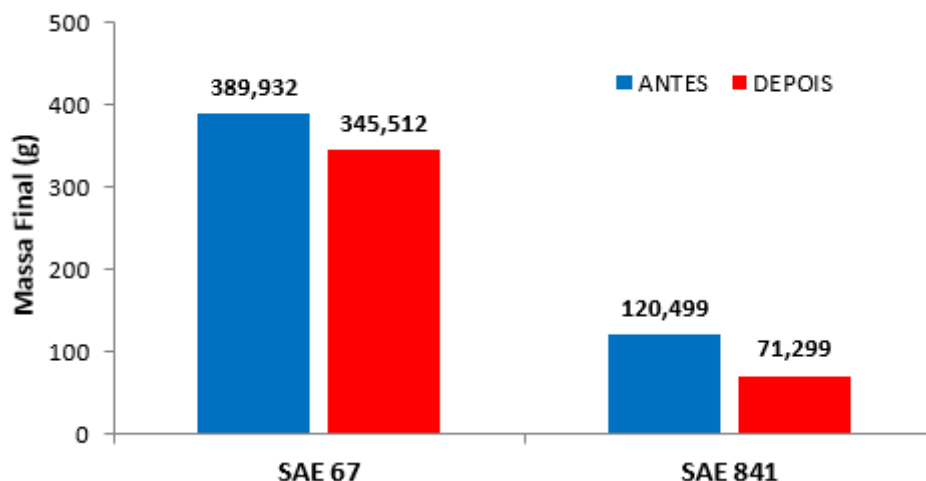


Figura 15: Perda de Massa das amostras de bronze SAE 67 e SAE 841 para uma projeção de 300 horas  
Fonte: Do autor

De acordo com os resultados do gráfico da Fig. 15, é possível relacionar o valor da perda de massa com o preço de custo por kg de cada liga de bronze. O Qd.



7 apresenta valores demonstrativos de custo da perda de massa para cada material, nela é possível verificar que o bronze SAE 841 apresentou um custo aproximadamente quatro vezes maior em relação ao bronze SAE 67.

Quadro 7: Resultado do custo da perda de massa para cada material.

Material	Perda de Massa (g)	Preço de Custo por (kg)	Custo da Perda de Massa (R\$)
SAE 67	44,42	65,00	2,88
SAE 841	49,20	230,00	11,31

Fonte: Do autor

## 5 CONCLUSÕES

A caracterização química e microestrutural das amostras estudadas confirmaram que os bronzes SAE 67 e SAE 841 utilizados nos testes apresentaram resultados compatíveis com a literatura e com as normas de fornecimento.

Em relação à dureza, apesar do bronze SAE 67 ser fundido por centrifugação não verificou-se que houve variação de dureza entre a extremidade e o núcleo da amostra, tanto na periferia quanto no centro da amostra a dureza se manteve de acordo com a norma. Em relação ao bronze SAE 841 apesar de não ter uma norma que o classifique, verificou-se que o perfil de dureza em uma região menos porosa apresentou pouca variação.

Na análise metalográfica do bronze SAE 67 ficou evidenciado a presença de uma fase alfa e de uma fase delta conforme diagrama de fase cobre-estanho. Por não apresentar afinidade com o cobre e estanho o chumbo encontrou-se nos contornos de grão, desta forma atua como lubrificante sólido e tem a função de reduzir o coeficiente de atrito. Nas amostras de bronze SAE 841 percebe-se a formação de vazios decorrentes do processo de fabricação por metalurgia do pó, estes vazios tem o propósito de reterem no seu interior lubrificantes e desta forma reduzir o coeficiente de atrito.

Em relação aos resultados do ensaio de desgaste confirma-se que o coeficiente de atrito do bronze SAE 67 é superior ao SAE 841 em torno de 50%, porém ao final do ensaio percebeu-se que a perda de massa do bronze SAE 841 foi superior ao SAE 67, apresentando um custo aproximadamente quatro vezes maior em relação ao mesmo. A maior perda de massa para o bronze SAE 841 está diretamente ligada



à presença de porosidade em sua microestrutura facilitando assim a remoção de material por arrancamento.

Os resultados do mesmo ensaio confirmaram que os valores do coeficiente de atrito são dependentes do tempo de ensaio, apesar do bronze SAE 67 ter apresentado uma variação na estabilização do coeficiente de atrito nos primeiros metros percorridos, ficou constatado que os materiais da esfera (aço inox, metal duro, aço 52100) para os bronzes 841 e SAE 67 não influenciaram na média do coeficiente de atrito ao final do ensaio.

Finalmente, com base nos resultados dos ensaios realizados verifica-se que apesar do bronze SAE 67 apresentar perda de massa e custo inferior ao bronze SAE 841, a substituição pelo mesmo ainda deve ser avaliada de forma criteriosa, analisando as variáveis tribológicas de trabalho como: meio, ausência de lubrificação forçada, temperatura e tipos materiais em contato por deslizamento.

Fica como sugestões para trabalhos futuros, acrescentar maior porcentagem de chumbo na liga do bronze SAE 67, para que esse elemento, em condições tribológicas, atue como lubrificante sólido e diminua o coeficiente de atrito. Realizar um estudo tribológico entre os materiais estudados utilizando lubrificação forçada, para avaliar o coeficiente de atrito e a perda de massa entre ambos.

Desenvolver um estudo de viabilidade econômica e analisar os materiais em condições reais de trabalho.

## REFERÊNCIAS

ASTM G99-05. **Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus.** West Conshohocken: PA, 2005.

ASTM E250. **Standard Practice for Use of CODEN.** 1998.

ASTM E384. **Standard test method for microindentation hardness of materials.** 2016.

ASM METALS HANDBOOKS. **Metallography and microstructures.** USA: Ed. ASM International, 1988. Vol. 9. p. 775-788.



BATCHELOR, A.W., STACHOWIAK, G.W. **Engineering tribology**. 2. ed. Australia: Butterworth-Heinemann, 2000.

BHUSHAN, B. **Introduction to tribology**. New York: Ed. John Wiley & Sons, 2002. 732 p.

CALLISTER, W. D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2007.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. 3. ed. São Paulo: Ed. ABM, 1992.

CORONADO, J.J. **Estudo do desgaste por deslizamento em bronzes**. Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia. p. 98-107, 2007.

COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1974.

DHANASEKARAN, S., GNANAMOORTHY, R. Abrasive Wear Behavior of Sintered Steels Prepared With MoS<sub>2</sub> Addition. **Wear**, vol. 262, n. 5-6, p. 617-623, 2007.

EQUEY, S., HOURIET, A., MISCHLER, S. Wear and Frictional Mechanisms of Copper-Based Bearing Alloys. **Wear**. p. 9-16, 2011.

GHORBANI, M., MAZAHERI, M., AFSHAR, A. **Wear and friction characteristics of electrodeposited graphite-bronze composite coatings**. 2004

GOMES, M. R. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. São Paulo: ABM, 1987.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992.

LEITE, A. L. **Comportamento tribológico do aço SAE 10B30 revestido com TiO<sub>2</sub> depositado por plasma**. 2012.



METALLURGICAL ENGINEERING, MECHANICAL ENGINEERING. **Wear of some single-phase copper-base alloys.** vol. 197, p. 17-37, 1996.

MORO N., AURAS, A. P. **Metalurgia do pó e o futuro da indústria.** Florianópolis, 2007.

MUTERLLE, P. V. Surface durability and design criteria for graphite–bronze sintered composites in dry sliding applications. **Materials & Design**, vol. 32, n. 7, p. 3.756-3.764, 2011.

NACIONAL BRONZE. **Brass and bronze standard casting alloys chart of specifications.** Disponível em: <www.national bronze >. Acesso em: 22 maio 2017.

OZSARAC, U., FINDIK, F., DURMAN, M. The wear behavior investigation of sliding bearings with a designed testing machine. **Materials & Design**, vol. 28, n. 1, p. 345-350, 2007.

PRASAD, B. K. Sliding wear behaviour of bronzes under varying material composition, microstructure and test conditions. **Wear**, vol. 257, p. 110-123, 2004.

RIGNEY, D. A. Comments of metals on the sliding **wear**. vol. 30, n. 5, p. 361-367, 1997.

RIVAS, J. S., CORONADO, J. J., GOMES, A. L. **Tribological aspects for the shafts and bearings of sugar cane mills.** 2006.

SIEGEL, M. **Curso de fundição.** São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1975.

VERDI, J. **Dispositivo pino-disco para análise de desgaste na presença de diesel e biodiesel.** 2011.

YOSHIDA, A. **Metais, ligas e tratamento térmico.** 2. ed. Rio de Janeiro: Ed. Esparsa, 1980. p.148-149.

## AGRADECIMENTOS





Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela capacidade física e mental que me concede todos os dias. Aos pais, amigos e a esposa pelo total apoio. Ao Prof. Me. Fábio Peruch por seus conhecimentos passados e por sua orientação neste trabalho e também aos professores, Elvys Mercado Curi e Franco Wronski Comeli pela prestividade e grande auxílio. A faculdade SATC e as empresas Fundação Arte e Fundação Bitencourt pelo suporte físico.