

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

**Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais**



DISSERTAÇÃO

**Casquilhos à base de prata para aplicação em motores veiculares à
combustão interna**

José Artur Ramos da Silva

Pelotas, 2012

José Artur Ramos da Silva

Casquilhos à base de prata para aplicação em motores veiculares à combustão interna

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciências e Engenharia de Materiais (área de concentração: Materiais Nanoestruturados)

Orientador:

Prof. Dr. Sergio da Silva Cava

MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS

Pelotas – RS

Março / 2012

Banca examinadora:

Prof. Dr. Sergio da Silva Cava

Prof. Dr. Mário Lúcio Moreira

Prof. Dr. Mário Boéssio

Profa. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves (suplente)

Dedicatória

A meu tio Luiz Carlos Martins da Silva (in memoriam) que, com seus ensinamentos sobre mecânica, me fez vislumbrar a vocação para essa área.

A meu pai, Arthur Martins da Silva (in memoriam), que me proporcionou os primeiros contatos com ligas de metais nobres, com as quais me envolvi pela vida toda.

A meu filho André Shaun da Silva, razão da minha vida.

Agradecimentos

A minha mãe, Ramona Ramos da Silva, pelo carinho, dedicação e incentivo;

A minha esposa Ana Maria, pela motivação para ingressar neste programa;

Ao amigo Paulo Rizzollo, companheiro incansável, presença marcante em todas as fases de experimentos, contribuindo com seus largos conhecimentos e, inclusive, com a disponibilização de equipamentos e máquinas de sua oficina durante toda a pesquisa;

Ao IFSul e aos colegas do Curso Técnico em Eletromecânica pelo apoio para realização deste trabalho;

Aos professores do programa por tudo que me ensinaram;

Ao Prof. Dr. Eng. Sergio da Silva Cava, pelo entusiasmo constante, pela orientação segura, apoio e ensinamentos, sem os quais eu não desenvolveria esta pesquisa.

*“SE À PRIMEIRA VISTA A IDEIA NÃO FOR ABSURDA,
NÃO HÁ ESPERANÇA PARA ELA”.*

Albert Einstein

Resumo

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma nova liga metálica à base de prata para casquilhos de motores à combustão interna, aplicados em mancais hidrodinamicamente sustentados. Para tanto, foram articulados referenciais teóricos que propiciaram uma melhor compreensão das ligas metálicas, ensaios mecânicos para caracterização das ligas de prata com cobre, chumbo e estanho, propiciando comparativos para determinar qual das situações teve o melhor desempenho como liga antifricção. Dentre as ligas analisadas, a que demonstrou desempenho superior foi a prata 995 (99,5% de prata com 0,5 de cobre). Embora a prata 995 apresente custo mais elevado, o ganho de eficiência em relação aos materiais atualmente utilizados e a minimização dos impactos ao homem e ao meio ambiente, compensam e justificam sua aplicação e utilização.

Abstract

The objective of this research was to develop a new alloy silver-based bushings for internal combustion engines, applied in bearings hydrodynamically supported. Thus, theoretical frameworks were articulated for provide a better understanding of alloys, mechanical tests for characterization of silver alloys with copper, lead and tin. These provided comparative to determine which had the best performance as antifriction alloy. Among the analyzed alloys that outperformed the silver was 995 (99.5 % silver with 0.5 copper). Although silver 995 present higher cost, gain efficiency compared to currently used materials and minimize impacts to humans and the environment, outweigh and justify their application and use.

Sumário

Lista de Figuras	
Lista de Tabelas	
1 Introdução	11
1.1 Ligas de Prata	11
1.2 Antecedentes	11
1.3 Justificativa	12
1.4 Descrição do motor de combustão interna	13
Biela:	13
Árvore de Manivelas:	13
Casquilho:	14
Geometria dos casquilhos:	15
1.5 Interação dos casquilhos com o motor durante sua vida útil.....	18
2 Objetivos e metas	24
2.1 Objetivo Geral	24
2.2 Objetivos Específicos	24
3 Metodologia	25
3.1 Elaboração das ligas de prata.....	25
3.2 Produção dos casquilhos experimentais a base de prata 995.....	27
3.3 Teste de usabilidade dos casquilhos produzidos	29
3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura	29
3.5 Avaliação dimensional	30
4 Resultados e Discussão	32
4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura	32
4.2 Avaliação da textura superficial	33
5 Conclusão	37
REFERÊNCIAS	38

Lista de Figuras

1	Foto de uma biela de motor de Mercedes 608 D.....	13
2	Virabrequim de motor Agrale 12.....	14
3	Casquilhos sendo colocados em biela.	15
4	Dois pares de casquilhos motor GM 1.0 VHC.	16
5	Camadas metálicas de um casquilho. Fonte: Catálogo MAHLE Metal Leve.....	17
6	Filme de óleo entre as superfícies metálicas em contato. Fonte catálogo MAHLE metal Leve.	19
7	Superfície metálica ampliada 20.000 vezes.	21
8	a) Secção de duas superfícies de metal em contato. b) Pontos em contato das superfícies sob carga. c) Ruptura dos pontos em contato devido ao movimento relativo das partes (desgaste por abrasão). Fonte catálogo MAHLE metal Leve.....	21
9	(a) Fusão da liga prata chumbo. (b) Fusão da liga prata cobre.	26
10	(a) Fundição e produção do lingote. (b) Aspecto do lingote de prata 995.	27
11	(a) Processo de laminação a frio. (b) Recozimento da lâmina de liga de prata.	28
12	(a) Preparação para a soldagem. (b) Soldagem do elemento de prata 995 na capa de aço do casquilho. (c) Final da soldagem por brasagem com solda prata industrial.....	28
13	Torneamento objetivando as medidas recomendadas pela GM do Brasil para utilização em um motor 1.0 VHC flex power standard.	29
14	Rugosímetro em operação.	30
15	Representação esquemática de R_a	31
16	Representação esquemática de R_z	31
17	Micrografia de MEV de casquilho de prata. Imagens representam aumentos sucessivos, demonstrados por meio dos retângulos internos.....	33
18	Micrografia de MEV de casquilho de prata. (a) Análise EDX geral da amostra. (b) Região de incrustação delimitada.	33
19	Aspecto da superfície do casquilho antes da utilização.	34
20	Aspecto da superfície do casquilho prata após 8000km rodados.....	34
21	Aspecto da superfície do casquilho original após 8000 km rodados.	34
22	Dimensão E, que representa a espessura do casquilho na região indicada pela cota.	35

Lista de Tabelas

1	Dureza escleroscópica para os materiais utilizados como antifricção.	23
2	Dureza Brinnel para os materiais utilizados como antifricção.	23
3	Ligas experimentais utilizadas.	26
4	Resultados obtidos em medições dos casquilhos utilizados.	34
5	Resultados obtidos em medições dos casquilhos utilizados.	35

1 Introdução

Os materiais metálicos não são altamente puros; ao contrário, eles são ligas, nas quais átomos impurezas foram adicionados intencionalmente para conferir características específicas aos materiais. Normalmente, utiliza-se adicionar elementos de liga em metais para melhorar a resistência mecânica e resistência à corrosão (CALLISTER, 2008).

1.1 Ligas de Prata

A prata é consideravelmente macia quando pura. Na sua liga com o cobre, adquire maior dureza e resistência, porém se torna mais suscetível à oxidação. A prata é estável no ar e água puros, mas muda de cor sob ação de ozônio, sulfeto de hidrogênio ou ar com enxofre. Cobre, zinco, platina e paládio podem ser adicionados a ligas de prata para alterar as suas propriedades (GOEDERT, 2006).

1.2 Antecedentes

As ligas antifricção ou resistentes ao atrito são utilizadas pela indústria mecânica desde o século XVIII. Atualmente, ainda são usadas em situações especiais e por isso tiveram de evoluir para atingir os níveis necessários para sua aplicação (JESUS-FILHO, 2011). Em 1839, Isaac Babitt(inventor norte-americano) desenvolveu ligas de cor clara à base de chumbo ou estanho, em alguns casos aditivadas com antimônio, cádmio, cobre ou níquel, entre outros, visando sua aplicação em mancais de máquinas a vapor (BABBIT, 1839). Essas ligas são utilizadas em mancais do tipo bronzina, nome dado aos mancais de bronze que não apresentavam características ideais para utilização em algumas situações mecânicas e que, por isso acabaram sendo substituídos pelos mancais de ligas antifricção desenvolvidas por Isaac Babitt, pois estes que

apresentam maior eficiência ao atrito e conseqüentemente, maior resitência ao desgaste. São chamadas de Metal Patente, Metal branco, Metal Babitt ou simplesmente Babitt (os dois últimos nomes são referência ao seu inventor). Normas internacionais especificam, atualmente, pelo menos 14 ligas de Metal Patente, com diferentes composições químicas e propriedades específicas para cada aplicação industrial. Existem as ligas à base de Sn (Estanho), ligas à base de Sn e Pb (Chumbo) e ligas à base de Pb (SIQUEIRA; CHEUNG; GARCIA, 2003). Outros elementos como Sb (Antimônio) e Cu (Cobre) são também empregados (LEE; KIM; MIN, 1993). São materiais de baixo ponto fusão e baixo coeficiente de atrito.

1.3 Justificativa

As ligas antifricção ainda são amplamente utilizadas pela indústria mecânica em diversas situações, dentre as quais podemos citar os motores a combustão interna, micromotores elétricos, máquinas e equipamentos mecânicos entre outros (FERGUSON, 1985). As ligas antifricção para mancais de alta rotação e grande performance utilizadas nos motores a combustão interna, atualmente utilizadas em veículos automotores, apresentam características especiais para cumprirem sua função, pois precisam resistir ao desgaste e ao atrito existente nos mancais de deslizamento de grande velocidade periférica, pois sua maior finalidade é garantir o bom funcionamento e a vida útil dos componentes mais caros do conjunto motriz (SMITH; KEOLEIAN, 2004).

As ligas antifricção para essa aplicação industrial são hoje propriedade de um mundial oligopólio industrial (ROHATGI, 1991). São construídas à base de chumbo e estanho através de eletrólise, sinterização, spooter e outros de processos industriais sofisticados, de alto custo, elevado consumo energético e de grande impacto negativo ambiental, pois utilizam metais pesados na sua produção, sendo que o chumbo atualmente está sendo evitado ao máximo pelas indústrias primeiro mundistas pelos danos que pode causar ao homem e ao meio ambiente (SMITH; KEOLEIAN, 2004).

Com o presente trabalho, pretende-se desenvolver estudos para fabricação

de uma liga à base de prata para confecção de casquilhos de mancais. Embora esse material tenha custo mais elevado, espera-se obter a compensação da redução do custo industrial, do ganho de eficiência e da minimização dos impactos negativos ao homem e ao meio ambiente.

1.4 Descrição do motor de combustão interna

Para uma melhor compreensão do trabalho a ser realizado, descrevemos a seguir algumas partes básicas de um motor de combustão.

Biela: É um componente do motor que fica entre o êmbolo(pistões) e a árvore de manivelas (virabrequim). Tem, como função, transmitir os movimentos dos pistões para a árvore de manivelas no tempo motor (explosão) e da árvore de manivelas para o êmbolo nos tempos não motores (admissão, compressão e escape) (HEYWOOD, 1988). A imagem da Figura 1 ilustra uma biela de motor de Mercedes 608 D.



Figura 1: Foto de uma biela de motor de Mercedes 608 D.

Árvore de Manivelas: É o nome técnico dado ao eixo principal de um motor de combustão, cuja finalidade é a de transformar os movimentos lineares dos êmbolos

(pistões) em movimentos rotativos, também conhecido por virabrequim ou girabrequim. A imagem da Figura 2 ilustra o virabrequim de um motor Agrale 12 HP (MENDES, 2005).



Figura 2: Virabrequim de motor Agrale 12.

Casquilho: Conhecido também como bronzina (ver Figura 3), sua função é essencialmente proteger e prolongar a vida dos elementos móveis de maior responsabilidade e custo, como o virabrequim e seu alojamento. A bronzina deve sofrer os danos que, de outro modo, iriam alcançar a outra peça.

A função principal de um casquilho é reduzir o atrito entre uma parte móvel de um motor e a parte estática a ela ligada. Além disso, ela deve suportar a parte móvel. Esta última função exige que a bronzina resista a cargas muito altas, particularmente, cargas de alto impacto causadas pela combustão que ocorre no motor. A capacidade de uma bronzina de reduzir o atrito está baseada no fenômeno de que dois materiais não similares, deslizando um contra o outro, apresentam atrito e desgaste menores, quando comparados ao caso de materiais similares (materiais com dureza da mesma ordem de grandeza). Portanto, ligas de alguns metais, tais como cobre, estanho, chumbo ou alumínio, apresentam um melhor desempenho ao supor-



Figura 3: Casquilhos sendo colocados em biela.

tar uma parte móvel de aço, do que aquele apresentado por um alojamento de aço ou ferro fundido. Embora uma bronzina possa realizar sozinha essa função de redução de atrito, seu desempenho é enormemente melhorado pela adição de um lubrificante entre a parte móvel e a superfície interna da bronzina. Por isso, um dos objetivos principais do projeto de uma bronzina é estabelecer e manter um filme de óleo entre essas superfícies, geralmente sob cargas variáveis. Um pequeno desgaste ocorre quando o motor funciona, mesmo quando bronzinas do projeto mais avançado são instaladas em um novo modelo de motor altamente eficiente (CHOLLET, 1981).

Geometria dos casquilhos: São formadas por duas carcaças de aço de forma semicirculares iguais (Figura 4) para facilitar a montagem, revestido interiormente de metal macio (antifricção) com propriedades para reduzir o atrito.

Os tipos de casquilhos utilizados em máquinas e motores são denominados conforme as características de sua construção, entre os quais podemos citar:

- Bronzinas sólidas feitas inteiramente de um tipo de metal, na maioria das vezes uma liga de bronze.



Figura 4: Dois pares de casquilhos motor GM 1.0 VHC.

- Bronzinas bimetálicas com uma base de aço, uma camada intermediária e uma camada de metal antifricção, onde ligas de alumínio são utilizadas principalmente para a camada de metal antifricção.
- Bronzinas trimetálicas com uma base de aço, uma camada de liga base, uma camada-barreira e a camada antifricção. A camada de liga base é feita principalmente de um tipo de bronze e é geralmente aplicada por meio de um processo de galvanoplastia.
- Bronzinas sputter são de altíssima qualidade, também são bronzinas trimetálicas feitas dos mesmos materiais. Contudo, uma camada de Al-SM extremamente resistente é depositada sobre o material patente por meio de um método especial de produção, o processo sputter. Por receberem esse revestimento, essas bronzinas apresentam significativamente maior dureza e resistência ao desgaste. Elas são especialmente adequadas para motores de alta performance, como os turbinados em automóveis e veículos comerciais. Por isso, são especialmente utilizadas nas bronzinas centrais e bronzinas de biela.

Quanto às camadas metálicas que o compõe, geralmente são construídos conforme a Figura 5.

Os materiais ideais para produção de casquilhos devem apresentar as seguintes propriedades (ALVES; RODRIGUES, 2004):

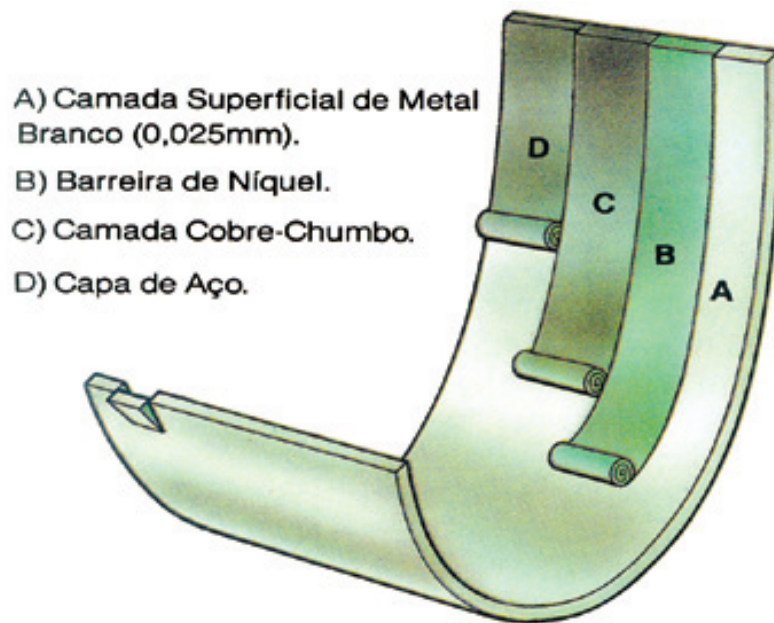


Figura 5: Camadas metálicas de um casquilho. Fonte: Catálogo MAHLE Metal Leve.

- Resistência à fadiga: é a propriedade do material para bronzina de resistir à carga intermitente que é aplicada sobre ela por um espaço de tempo especificado. Os diversos materiais de bronzinas têm capacidades diferentes para resistir a essas cargas sem se deteriorarem.
- Conformabilidade: é a propriedade do material de bronzina que confere a esta a característica de assumir a forma do alojamento e/ou colos.
- Incrustabilidade: (embedabilidade ou absorção) é a propriedade do material para bronzina de absorver partículas sólidas estranhas, que poderiam vir a riscar o eixo que a bronzina está suportando. Em outras palavras, o material de bronzina deve ser suficientemente capaz de permitir que essas partículas fiquem incrustadas na superfície da peça.
- Deslizamento (ação de superfície): é a propriedade do material de bronzina de resistir ao arraste que poderia ocorrer entre bronzina e eixo, quando entram em contato direto, durante a operação do motor.
- Resistência à corrosão: é a propriedade do material de bronzina de resistir à corrosão química, tal como a causada pelos ácidos que se formam na reação

dos produtos de combustão.

- Resistência a altas temperaturas: é a propriedade do material de bronzina de suportar altas temperaturas de operação do motor, sem que este perca as características responsáveis pela capacidade de carga e/ou ação de superfície.
- Condutividade térmica: é a propriedade do material de absorver e transferir calor da superfície interna da bronzina para o alojamento. Esta característica é importante porque a bronzina se comporta melhor quanto menor for a sua temperatura de operação.

1.5 Interação dos casquilhos com o motor durante sua vida útil

Nos motores à combustão interna, os mancais de deslizamento são hidrodinamicamente sustentados (HESHMAT, 1981). Nesse tipo de mancal, o desgaste torna-se reduzido, embora ocorra, trabalham com um filme de óleo lubrificante entre as duas partes metálicas (AUCÉLIO et al., 2007) em contato onde a espessura varia entre 0,002mm e 0,005mm. Essa lubrificação é constante e garantida por um sistema de bombeamento do próprio motor, que mantém o filme de óleo pressurizado permanentemente durante o funcionamento, evitando dessa forma o contato direto entre as superfícies metálicas do mancal de deslizamento que só ocorre eventualmente ou por problemas de lubrificante, na partida do motor, por partículas abrasivas indesejáveis vindas do meio externo ou por despressurização da bomba de óleo, conforme demonstrado na Figura 6.

O filme de óleo entre as duas superfícies de metal em contato tem duas características importantes: as moléculas de óleo tendem a deslizar mais livremente umas sobre as outras, as moléculas de óleo aderem mais firmemente sobre as superfícies do metal do que uma sobre as outras. A Figura 6 mostra o fenômeno. A camada superior das moléculas de óleo adere à superfície do metal em movimento e move-se com ela. Dessa forma, ela se desloca sobre a segunda camada de moléculas de óleo,

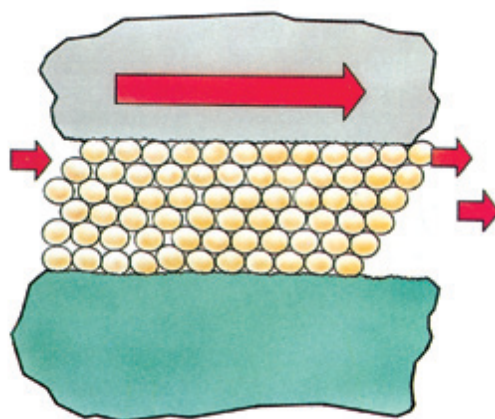


Figura 6: Filme de óleo entre as superfícies metálicas em contato. Fonte catálogo MAHLE metal Leve.

aplicando um esforço que faz esta camada mover-se também, porém numa proporção menor. Do mesmo modo, esta segunda camada desloca-se sobre a terceira e a arrasta numa velocidade bem menor. Isso continua a ocorrer através de todas as camadas de óleo subsequentes até a camada mais inferior, que permanece estática, grudada na superfície da peça de metal parada. Essa ação reduz o atrito a um valor bastante inferior àquele atingido pelas duas superfícies de metal, quando não existe o filme de óleo.

De forma geral, o desgaste pode ser definido como uma mudança cumulativa e indesejável em dimensões, motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfícies em contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, a ações mecânicas. Segundo a Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento (OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development) da ONU, desgaste pode ser definido como sendo um dano progressivo que envolve a perda de material (WILLIAMS, 1999), perda a qual ocorre na superfície de um componente como resultado de um movimento relativo a um componente adjacente. Na maioria das aplicações práticas, quando ocorre o movimento relativo entre duas superfícies sólidas, este movimento ocorre na presença de lubrificantes. De forma geral, o desgaste também pode ser definido como a indesejável e cumulativa mudança em dimensões motivada pela remoção gradual de partículas discretas de superfície em

contato e com movimento relativo, devido, predominantemente, às ações mecânicas. Na realidade, a corrosão muitas vezes interage com o processo de desgaste modificando as características das superfícies sob desgaste, através da reação com o meio ambiente (STOETERAU; LEAL, 2004).

Nos mancais hidrodinamicamente sustentados, ocorrem dois tipos distintos de desgaste: por abrasão ou por oxidação.

O desgaste por abrasão é a forma de desgaste que ocorre quando uma superfície rugosa e dura, ou uma superfície mole contendo partículas duras, desliza sobre uma superfície mais mole e risca (ploughs) uma série de ranhuras nesta superfície. O material das ranhuras é deslocado na forma de partículas de desgaste, geralmente soltas. E esse tipo de desgaste por abrasão é denominado desgaste abrasivo de dois corpos.

O desgaste abrasivo pode ocorrer, também, em uma situação diferente, quando partículas duras e abrasivas são introduzidas entre as superfícies deslizantes, desgastando-as. O mecanismo desta forma de abrasivo parece ser o seguinte: um grão abrasivo adere temporariamente em uma das superfícies deslizantes, ou mesmo é incrustado nela, e risca uma ranhura na outra. Esse tipo de desgaste por abrasão é denominado desgaste abrasivos de três corpos (KHRUSCHOV, 1974).

O desgaste abrasivo do tipo dois corpos não ocorre quando a superfície dura deslizante é lisa. O desgaste abrasivo do tipo três corpos não ocorre quando as partículas no sistema são pequenas, ou quando são mais moles que os materiais deslizantes. É, portanto, possível conseguir que um sistema seja, inicialmente, livre de desgaste abrasivo. Quando o deslizante inicia, entretanto, o desgaste abrasivo pode se tornar um problema, porque os fragmentos de desgaste provenientes de outros processos de desgaste, frequentemente endurecidos por oxidação, começam a se acumular no sistema. Em outros casos, partículas contaminantes podem ser introduzidas no sistema deslizante, provenientes do meio ambiente.

A Figura 7 abaixo ilustra as superfícies metálicas com seus aspectos superficiais ampliados.



Figura 7: Superfície metálica ampliada 20.000 vezes.

As Figuras 8a, b e c, respectivamente, ilustram o desgaste abrasivo de dois corpos.

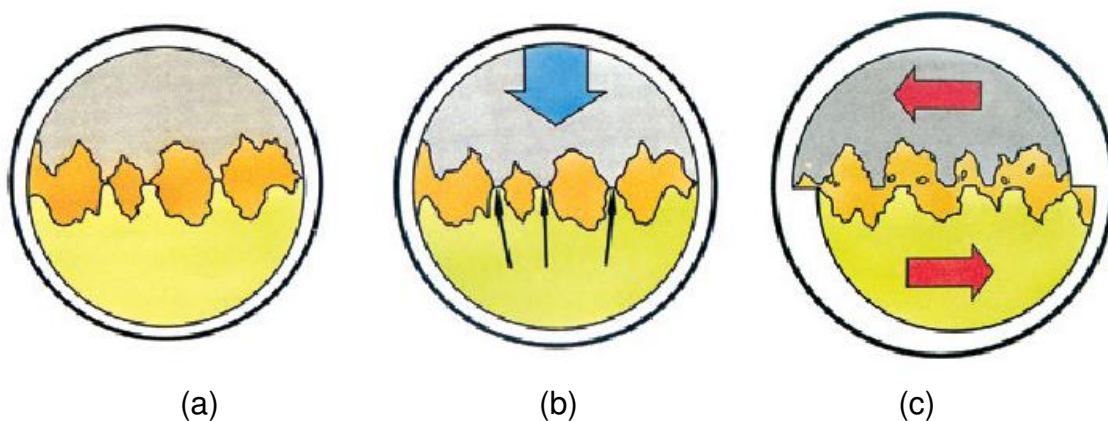


Figura 8: a) Secção de duas superfícies de metal em contato. b) Pontos em contato das superfícies sob carga. c) Ruptura dos pontos em contato devido ao movimento relativo das partes (desgaste por abrasão). Fonte catálogo MAHLE metal Leve.

Em condições de escorregamento em velocidades elevadas, o desgaste por oxidação pode ocorrer. A existência e a extensão deste tipo de desgaste, assim como a taxa de desgaste resultante, depende da capacidade que tem os materiais com movimento relativo em sofrer oxidação e, é claro, da presença de uma atmosfera oxidante (presença de oxigênio) nas imediações das superfícies em contato.

Como observado no desgaste por fusão, em velocidades inferiores a 1 m/s, os detritos resultantes do escorregamento de duas superfícies metálicas são principalmente metal, o que a alta velocidade tendem a ser basicamente óxido de ferro. Uma velocidade de 1 m/s é o suficiente para produzir picos de temperatura suficientemente elevados ($> 700^{\circ}\text{C}$) para produzir oxidação.

A presença de um filme de óxido na interface pode ser o suficiente para reduzir o desgaste (GUO-ZHENG et al., 2011; RAJARAM et al., 2011) meramente pelo efeito supressivo de sua presença, ou pelo menos reduzir o grau de interação entre as superfícies. Contudo, os filmes óxidos são finos e apresentam elevada dureza e fragilidade, e o desgaste ocorre principalmente pelo arranque deste material da superfície. Em elevada velocidade, ou elevado carregamento, o filme óxido torna-se mais espesso e contínuo, apesar do calor gerado por atrito ser considerável, as camadas interiores subsequentes de material sofrem menor condução de calor da camada oxidada, ou seja, a camada oxidada atua como um isolante térmico para as camadas internas. Porém, o calor gerado pode ser tal que o mesmo pode gerar deformações plásticas e até mesmo a fusão. O primeiro regime onde a camada de óxido é fina e frágil é denominado de desgaste por oxidação média, e o segundo é denominado de desgaste por oxidação severa, lembrando que severa e leve são a oxidação, e não a taxa de desgaste. O desgaste por oxidação leve tem sido objeto de intensas pesquisas ao longo das últimas décadas.

Uma das razões pelas quais escolhemos a prata 995 como metal antifricção foi o fato de ser um metal nobre que em estado quase puro não forma camada de óxidos na sua superfície de contato, nem mesmo com os resíduos ácidos gerados pela combustão, conforme comprovado em testes realizados reduzindo significativamente o desgaste do mancal.

Também a dureza da prata 995 estimulou a sua utilização nesta pesquisa, pois metais antifricção devem apresentar níveis de dureza em níveis bem abaixo do par metálico com o qual vai atuar em mancal de deslizamento (LANG; RUMPF, 2011).

Tabela 1: Dureza escleroscópica para os materiais utilizados como antifricção.

Metal	Estado recozido	Estado encruado
Babitt	4 a 9	-
Prata 995	6,5	20 a 30
Bronzes	10 a 15	24 a 25
Latões	7 a 35	-

Tabela 2: Dureza Brinnel para os materiais utilizados como antifricção.

Metal	Estado recozido
Babitt ao chumbo	15-20
Babitt ao estanho	20 a 30
Prata 995	25

As Tabela 1 e 2 ilustram valores de durezas Escleroscópica e Brinell, respectivamente, para os materiais utilizados como antifricção (WALLEY, 2012).

2 Objetivos e metas

Com esta pesquisa, pretende-se:

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver liga antifricção à base de prata para casquilhos de motores à combustão interna.

2.2 Objetivos Específicos

- Articular referenciais teóricos que propiciem uma melhor compreensão das ligas metálicas.
- Realizar ensaios para caracterização das ligas de prata com cobre, chumbo e estanho.
- Realizar ensaios mecânicos com prata 995 e prata ligada a outros metais, estabelecendo comparativos para determinar qual das situações terá melhor desempenho como liga antifricção.

3 Metodologia

A presente pesquisa, quanto à sua natureza, pode ser classificada como aplicada, uma vez que objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução do problema apresentado.

A fim de atingir os objetivos propostos, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

- Pesquisa bibliográfica sobre as ligas antifricção atualmente utilizadas;
- Produção das ligas de prata com cobre, chumbo e estanho;
- Produção dos corpos de prova de todas as ligas elaboradas;
- Ensaios preliminares de caracterização das ligas;
- Ensaios mecânicos com as ligas desenvolvidas;
- Teste dos 8000km rodados com os casquilhos de prata 995.

3.1 Elaboração das ligas de prata

O processo de fundição das ligas experimentais foi realizado com maçarico a oxigênio e GLP, a temperaturas de aproximadamente 1100°C.

As imagens da Figuras 9a e b ilustram o processo.

A Tabela 3 demonstra dados de composição e propriedades das ligas utilizadas.

A maleabilidade e a dureza permaneceram praticamente inalteradas nas ligas prata-chumbo, porém a formação de óxidos na superfície do material surgiu de forma rápida e intensa. Por ser assim, descartaram-se as ligas L1 e L2, já que camadas

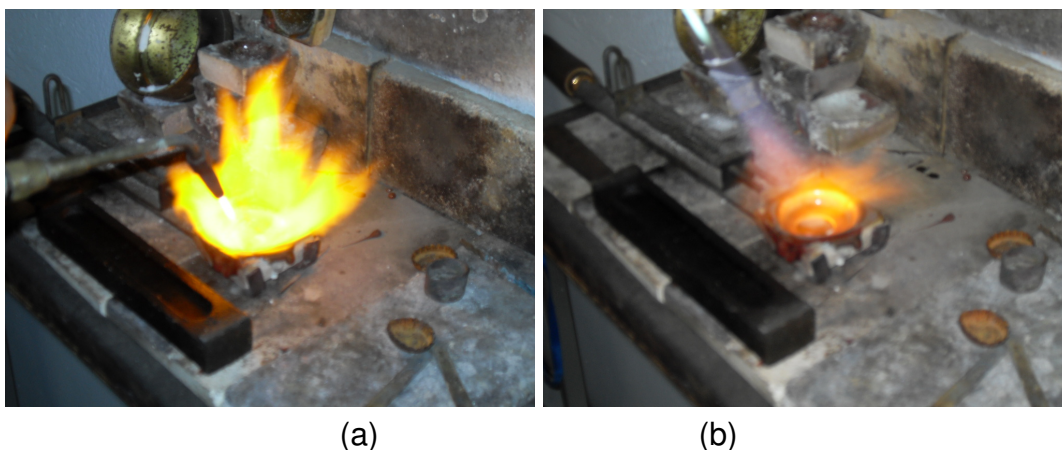


Figura 9: (a) Fusão da liga prata chumbo. (b) Fusão da liga prata cobre.

Tabela 3: Ligas experimentais utilizadas.

Liga	% prata	% chumbo	% cobre	Dureza	Maleabilidade	Oxidação
L1	95	5		baixa	alta	alta
L2	92,5	7,5		baixa	alta	muito alta
L3	92,5		7,5	média	média	alta
L4	95		5	média	média	média
L5	97,5		2,5	baixa	média	média
L6	99,5		0,5	baixa	alta	nula

oxidadas são extremamente prejudiciais aos materiais antifricção, pois representam desgaste excessivo e prematuro.

As ligas L3 e L4 apresentaram redução de maleabilidade e aumento da dureza, assim como também formaram rapidamente óxidos em suas superfícies quando em contato com óleos lubrificantes automotivos, razão pela qual também foram descartadas.

A liga L5 apresentou leve redução de maleabilidade e da dureza, mas também apresentou oxidação em contato com óleo lubrificante, assim sendo foi descartada.

A liga L6, também denominada comercialmente como “prata 995” com 0,5% de cobre foi a que apresentou melhores condições para ser utilizada como antifricção, manteve os níveis de maleabilidade e dureza conforme preconizam as literaturas referentes ao tema, não apresentou formação de óxidos na superfície em contato com lubrificantes e nem durante o aquecimento e subsequente resfriamento ao ar livre, portanto foi a escolhida para confecção de corpos de prova e casquilhos experimentais a

serem utilizados futuramente em motores automotivos.

3.2 Produção dos casquilhos experimentais a base de prata 995

O metal, após o processo de fundição, foi vazado em rilheira, conforme demonstra a Figura 10a, onde ficou resfriando até esfriar e solidificar ao ar livre, conforme Figura 10a. Observa-se que o ligante da liga de prata permanece em cor natural e brilhante, o que demonstra a não ocorrência de oxidação.

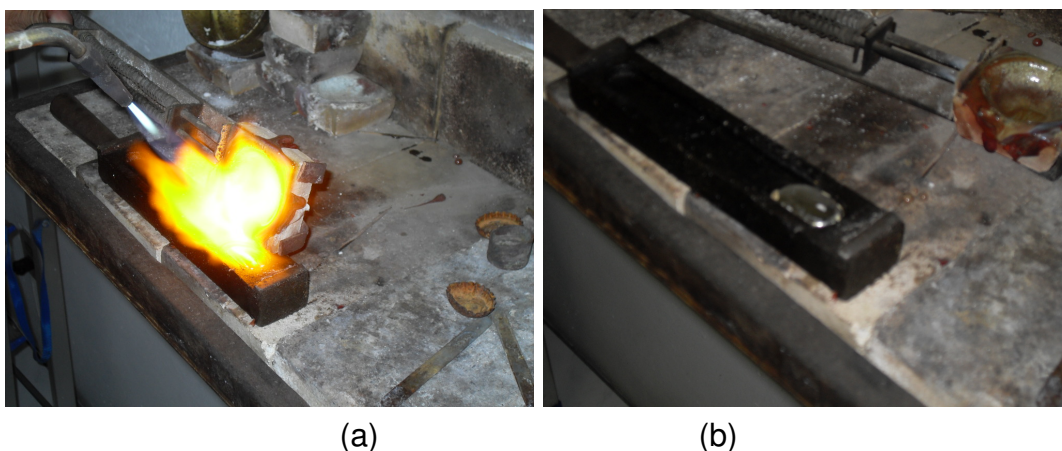


Figura 10: (a) Fundição e produção do lingote. (b) Aspecto do lingote de prata 995.

Após a obtenção do lingote, de aproximadamente 6mm de espessura, foi submetido a uma operação de laminação a frio, em um laminador elétrico de indústria joalheira, conforme demonstra a Figura 11a. O processo de laminação, foi repetido diversas vezes, até alcançar uma espessa final de aproximadamente 0,5 mm. Após a laminação, as lâminas obtidas foram recozidas a temperaturas de aproximadamente 950°C^1 , conforme ilustra a Figura 11b, para eliminação das tensões geradas pela laminação, alívio de tensões e padronização do tamanho de grão. Utilizou-se um maçarico de GLP.

Com a obtenção das lâminas, tornou-se possível a montagem e solda das mesmas sobre a capa de aço do casquilho, conforme ilustra a Figura 12.

Após este processo de montagem e soldagem, os casquilhos são usinados

¹ Temperatura medida por meio de um termógrafo marca RAY modelo 513-A.

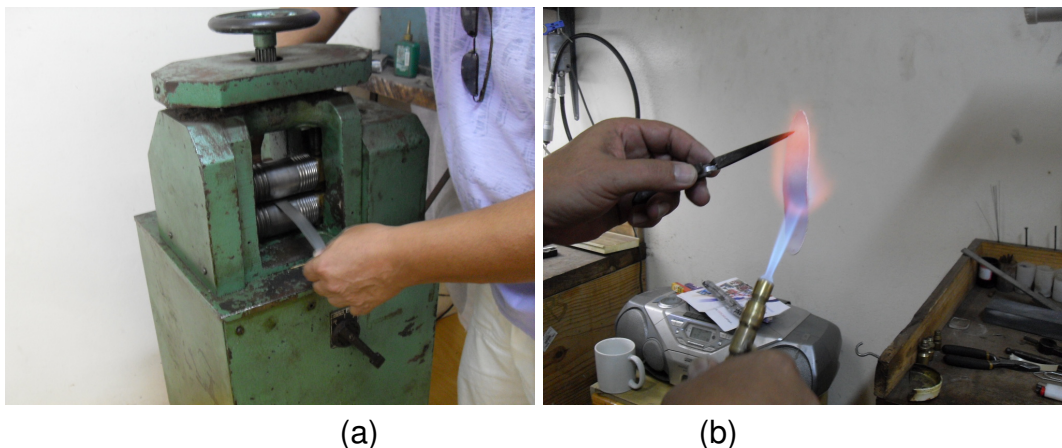


Figura 11: (a) Processo de laminação a frio. (b) Recozimento da lâmina de liga de prata.

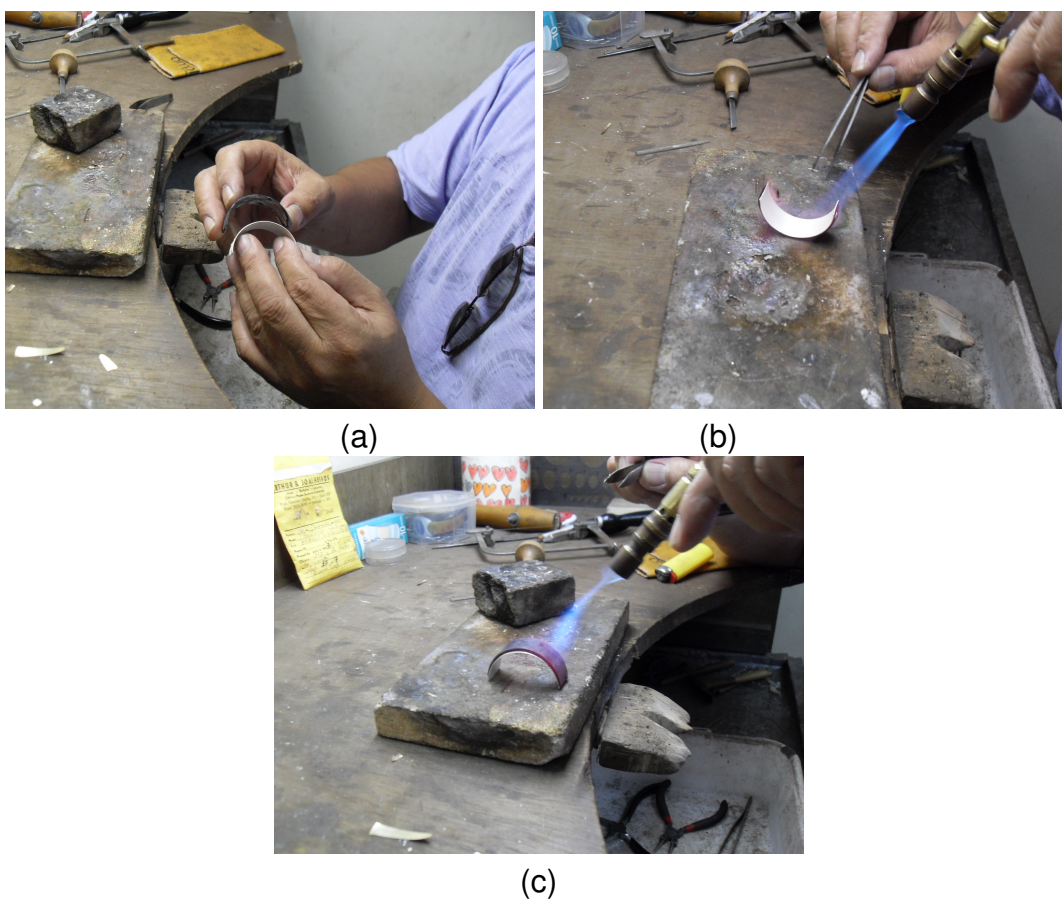


Figura 12: (a) Preparação para a soldagem. (b) Soldagem do elemento de prata 995 na capa de aço do casquilho. (c) Final da soldagem por brasagem com solda prata industrial.

em torno mecânico convencional com o objetivo de garantir as dimensões, tolerâncias e textura superficial recomendadas pelo fabricante (General Motors do Brasil).



Figura 13: Torneamento objetivando as medidas recomendadas pela GM do Brasil para utilização em um motor 1.0 VHC flex power standard.

3.3 Teste de usabilidade dos casquilhos produzidos

Para se fazer a avaliação e comparação criteriosa, foram utilizados durante 8000km, em um motor GM VHC FlexPower, em veículo Celta spirit ano de fabricação 2008, dois pares de casquilhos de prata 995 e dois pares de casquilhos originais simultaneamente. Após completar a quilometragem estabelecida, o motor foi aberto para extração dos quatro pares de casquilhos, que passaram por avaliações minuciosas quanto ao desgaste, utilizando-se de micrômetros eletrônicos digitais de 0,001mm de resolução, incrustabilidade por intermédio de microscópio eletrônico de varredura, análise da textura superficial com rugosímetro Mitutoio digital e análise dos aspectos gerais de superfície(tribológicos) através de microscópio eletrônico.

Após todos esses indicativos, foram estabelecidos comparativos entre os casquilhos convencionais à base de metais pesados e de prata 995, e foi dado início ao processo de registro da propriedade industrial/intelectual e por fim editaremos um artigo científico relatando o trabalho e os resultados obtidos.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a caracterização das ligas metálicas, foi utilizada a técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura.

A Microscopia Eletrônica de Varredura foi realizada em um microscópio mo-

delo SSX-550 da Shimadzu, onde foi avaliada a morfologia e estrutura das ligas metálicas antes e após os testes de usabilidade. Este equipamento encontra-se instalado no Laboratório de Caracterização do Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais da UFPel.

3.5 Avaliação dimensional

Para quantificar as diferenças da textura superficial, foi utilizado um rugosímetro da marca Time modelo TR 210, conforme Figura 14.



Figura 14: Rugosímetro em operação.

Para as medições lineares, foi utilizado um micrômetro digital marca Pantec de 0-25mm com resolução 0,001mm.

Ra é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (lm). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (lm). A Figura 15 representa Ra .

Rz rugosidade de profundidade é a distância vertical entre o pico mais alto e o mais profundo vale dentro de um comprimento de amostragem Rz Rugosidade de profundidade média é a média aritmética dos Rz_i em amostragem consecutivas, ou seja, é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima

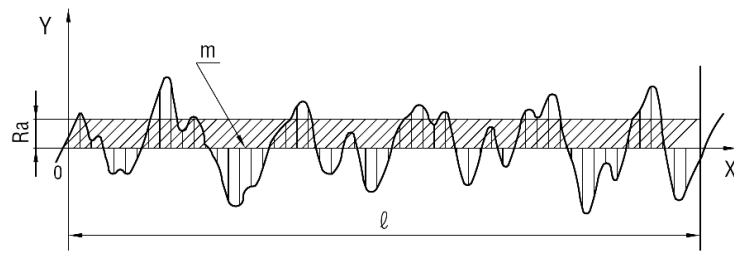


Figura 15: Representação esquemática de R_a .

e abaixo da linha média, existentes no cut off (comprimento de amostragem). Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem (l_e). A Figura 16 representa R_z .

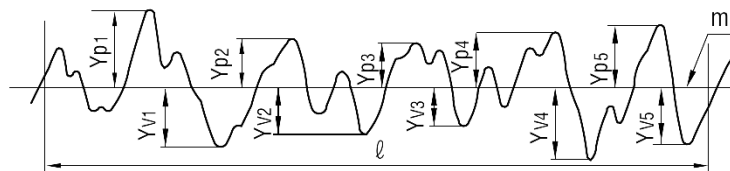


Figura 16: Representação esquemática de R_z .

4 Resultados e Discussão

Após rodados 8.000km em um veículo GM, modelo Celta Spirit 1.0 VHC, ano de fabricação 2008, com os casquilhos a base de prata, foram realizadas as avaliações de superfície e dimensionais nos referidos casquilhos através da comparação dos resultados com os casquilhos originais que utilizam como metal anti-fricção o alumínio 90-10(90% de alumínio 10% de estanho). Simultaneamente, foram utilizados dois casquilhos superiores a base de prata e dois originais, garantindo igualdade de condições de uso utilização para ambos, com vistas a estabelecer os comparativos preconizados pelo projeto.

4.1 Microscopia Eletrônica de Varredura

A Figura 17 ilustra imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura em amostras da prata 995. Após o uso, e aquecida a 200°C, não se constatou a formação de camada de óxidos, mas algumas incrustações de carbono, conforme demonstra análise química por EDX da Figura 18, provenientes do óleo lubrificante do motor.

Assim sendo, esses resultados também confirmam que a liga de prata 995 apresenta propriedades de incrustabilidade e deslizamento (ação de superfície) e de resistência à corrosão superiores às apresentadas na liga de alumínio 90-10.

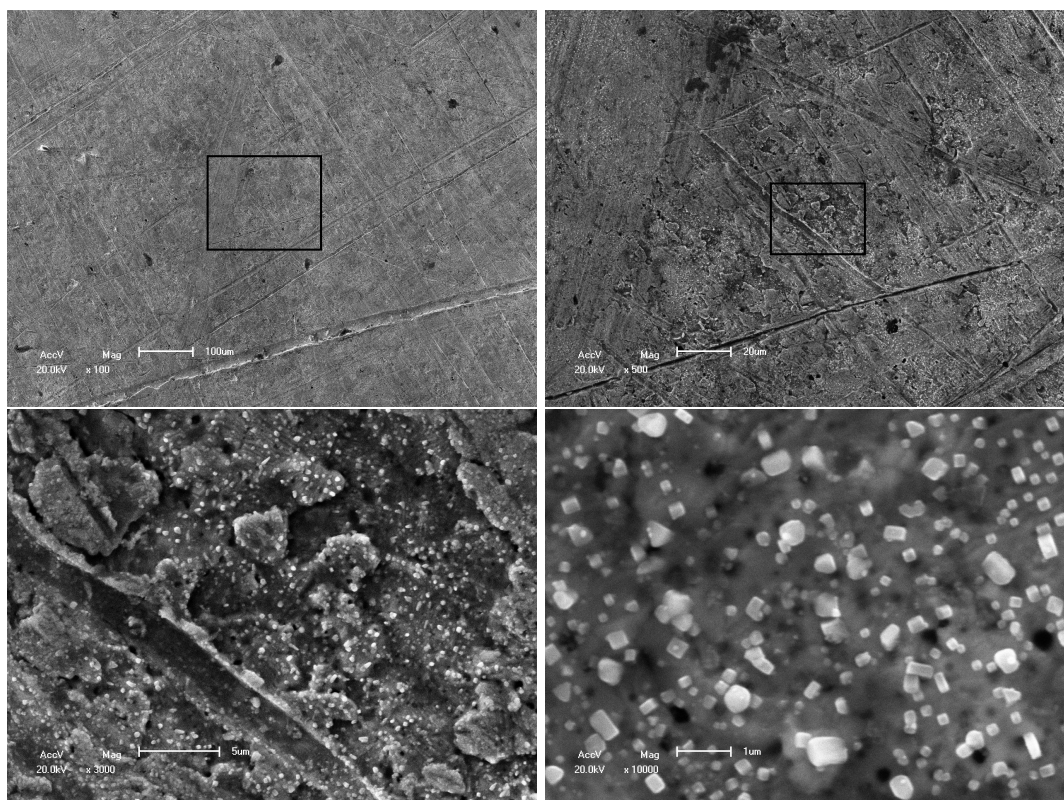


Figura 17: Micrografia de MEV de casquilho de prata. Imagens representam aumentos sucessivos, demonstrados por meio dos retângulos internos.

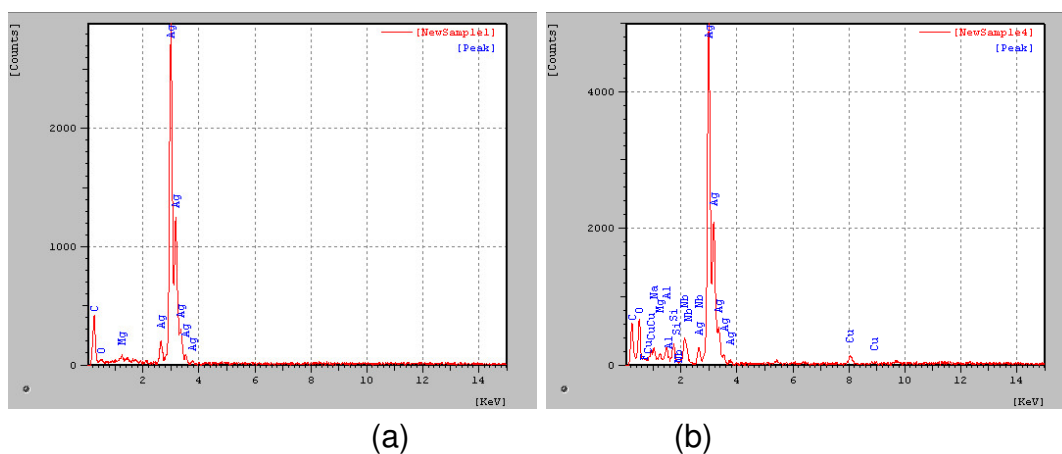


Figura 18: Micrografia de MEV de casquilho de prata. (a) Análise EDX geral da amostra. (b) Região de incrustação delimitada.

4.2 Avaliação da textura superficial

Para a verificação da textura superficial, foram utilizados inspeção visual e um rugosímetro. Na inspeção visual constatou-se nítida diferença no estado das superfícies, com ligeira vantagem para os casquilhos à base de prata perceptível nas Figuras 19, 20 e 21.



Figura 19: Aspecto da superfície do casquilho antes da utilização.



Figura 20: Aspecto da superfície do casquilho prata após 8000km rodados.



Figura 21: Aspecto da superfície do casquilho original após 8000 km rodados.

Foram realizadas medições para verificar dois parâmetros distintos Ra e Rz. Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 4

Tabela 4: Resultados obtidos em medições dos casquilhos utilizados.

	Ra ($m\mu$)	Rz ($m\mu$)
Casquilhos originais novos	0,200 - 0,210	1,579 - 1,750
Casquilhos a base de prata novos	0,200 - 0,210	1,579 - 1,500
Casquilhos originais após 8000 km rodados	1,496 - 1,543	10,400 - 10,786
Casquilhos a base de prata após 8000km rodados	0,803 - 0,832	4,659 - 4,866

Conforme os resultados de textura superficial verificados na tabela, é per-

ceptível que os casquilhos à base de prata apresentaram comportamento superficial distinto com relação aos de alumínio 90-10, pois estavam bem menos danificadas as superfícies.

A Figura 22 ilustra a dimensão E, que representa a espessura do casquilho na região indicada pela cota. Esta região é a de maior desgaste nos casquilhos superiores.

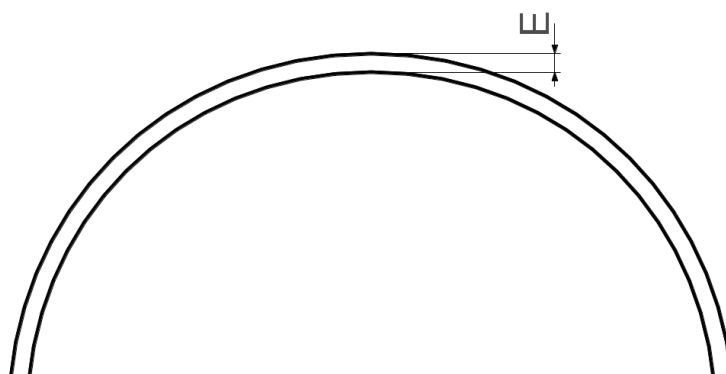


Figura 22: Dimensão E, que representa a espessura do casquilho na região indicada pela cota.

Para a verificação dimensional que indica o desgaste dos casquilhos após uso por 8000 km, foi utilizado um micrômetro digital Marca Pantec de 0 a 25mm, resolução de 0,001mm, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Resultados obtidos em medições dos casquilhos utilizados.

Casquilho	Dimensão E antes do uso (mm)	Dimensão E após 8000km rodados (mm)
Original alumínio 90-10	1,500	1,496
A Base de Prata	1,500	1,498

Pelos dados que foram elencados, pode-se concluir que os casquilhos à base de prata apresentam algumas características superiores aos casquilhos tradicionais à base de alumínio e de metal Babitt, dentre as quais duas se salientam:

- Incrustabilidade: (embedabilidade ou absorção) é a propriedade do material para bronzina de absorver partículas sólidas estranhas, que poderiam vir a riscar o eixo que a bronzina está suportando. Em outras palavras, o material de bronzina

deve ser suficientemente capaz de permitir que essas partículas fiquem incrustadas na superfície da peça.

- Deslizamento (ação de superfície): é a propriedade do material de bronzina de resistir ao arraste que poderia ocorrer entre bronzina e eixo, quando entram em contato direto, durante a operação do motor.

Verificadas as condições de superfície e dimensões dos casquilhos de prata 995 e dos de alumínio 90-10, constataram-se significativas vantagens dos casquilhos de prata. Como se pode observar na Tabela 4. Os resultados das medições de rugosidade dos casquilhos após 8.000 km rodados deixam claro que as superfícies mais preservadas são as dos casquilhos à base de prata. Analisadas as superfícies por dois parâmetros – R_a (desvio médio aritmético) e R_z (diferença vertical entre o vale mais profundo e o pico mais elevado) – ambos os resultados apresentaram valores bem inferiores nos casquilhos de prata 995, que confirma superfícies em melhor estado nestes casquilhos quando comparados com os comercialmente utilizados em alumínio 90-10.

Na Tabela 5 estão registrados os resultados das medições com micrômetro de resolução 0,001mm, na região “E” dos casquilhos (onde ocorre o maior desgaste), Esses resultados demonstram que os casquilhos de alumínio 90-10 apresentam um desgaste da ordem de 0,004mm e os à base de prata 0,002mm, desgaste significativamente inferior.

5 Conclusão

Esta pesquisa comprovou que a liga antifricção à base de prata superou em eficiência às atualmente comercializadas em casquilhos automotivos. Por suas características, a utilização dessa liga na construção de casquilhos e bronzinas fará com que a manutenção de motores à combustão interna se torne menos freqüente. Assim, essa pesquisa contribui para a otimização de motores de alta performance e rendimento, pois com casquilhos mais resistentes, os motores poderão atingir melhor desempenho e maior durabilidade.

É importante ressaltar que a produção desses casquilhos de prata 995 apresenta mínimo risco ambiental, sem utilização de metais nocivos ao meio ambiente, como o chumbo e o cádmio. Além disso, eles poderão ser confeccionados através de processos mecânicos de conformação, sem os malefícios dos processos eletroquímicos. Também tem a vantagem de possibilitar a produção por microempresa, sem a necessidades de equipamentos de alto custo e tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ALVES, L. M. M.; RODRIGUES, J. Modelação numérica e experimental do forjamento a frio de sinterizados de cobre. *Revista iberoamericana de ingeniería mecánica*, v. 8, n. 2, p. 103–115, 2004.
- AUCÉLIO, R. et al. The determination of trace metals in lubricating oils by atomic spectrometry. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, Elsevier, v. 62, n. 9, p. 952–961, 2007.
- BABBIT, I. Mode of making boxes. *US Patents*, n. 1,252, jul. 17 1839.
- CALLISTER, W. D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. [S.l.]: Livros Técnicos e Científicos, 2008.
- CHOLLET, H. M. *Curso prático e profissional para mecânicos de automóveis o motor e seus acessórios, motores a álcool*. [S.l.]: Hemus, 1981.
- FERGUSON, C. *International combustion engines; Applied thermosciences*. [S.l.]: John Wiley and Sons, New York, NY, 1985.
- GOEDERT, G. Seleção e caracterização de ligas de prata para a indústria joalheira. In: *17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Foz do Iguaçu: [s.n.], 2006.
- GUO-ZHENG, M. et al. Effect of surface nanocrystallization on the tribological properties of 1cr18ni9ti stainless steel. *Materials Letters*, Elsevier, 2011.
- HESHMAT, H. *Multi-stage support element for compliant hydrodynamic bearings*. [S.l.]: Google Patents, novembro 1981. US Patent 4,300,806.
- HEYWOOD, J. Internal combustion engine: fundamentals (ise). *Recherche*, v. 67, p. 2, 1988.
- JESUS-FILHO, E. S. *Porcessamento, usinagem e desgaste de ligas sinterizadas para aplicações automotivas*. Tese (Doutorado) — USP, 2011.
- KHRUSCHOV, M. Principles of abrasive wear. *Wear*, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 69–88, 1974.
- LANG, H.; RUMPF, T. *Alloy, in particular for a bearing coating*. [S.l.]: Google Patents, fev. 1 2011. US Patent 7,879,453.
- LEE, J.; KIM, B.; MIN, W. Calorimetric investigations of liquid cu-sb, cu-sn and cu-sn-sb alloys. *Journal of alloys and compounds*, Elsevier, v. 202, n. 1, p. 237–242, 1993.
- MENDES, A. *Desenvolvimento e Validação de Metodologia para Análise de Vibrações Torcionais em Motores de Combustão Interna*. Dissertação (Mestrado) — Dissertação de Mestrado. Campinas, 2005.

RAJARAM, G. et al. High temperature dry sliding wear behaviour of al-si/graphite composites processed by stir casting. *Supplemental Proceedings*, Wiley Online Library, p. 191–198, 2011.

ROHATGI, P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, Springer, v. 43, n. 4, p. 10–15, 1991.

SIQUEIRA, C.; CHEUNG, N.; GARCIA, A. The columnar to equiaxed transition during solidification of sn–pb alloys. *Journal of alloys and compounds*, Elsevier, v. 351, n. 1, p. 126–134, 2003.

SMITH, V.; KEOLEIAN, G. The value of remanufactured engines: Life-cycle environmental and economic perspectives. *Journal of Industrial Ecology*, Wiley Online Library, v. 8, n. 1-2, p. 193–221, 2004.

STOETERAU, R. L.; LEAL, L. C. *Apostila de Tribologia*, Universidade Federal de Santa Catarina. 2004.

WALLEY, S. M. *Historical origins of indentation hardness testing*. [S.l.]: Maney Publishing, 2012.

WILLIAMS, J. Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach. *Wear*, Elsevier, v. 225, p. 1–17, 1999.