

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GUILHERME PEREZ GUEDES

**METAL BABBITT COMO FORMA DE REAPROVEITAMENTO EM MANCAIS DE
TURBINAS HIDRELETRICAS**

GUARAPUAVA

2023

GUILHERME PEREZ GUEDES

**METAL BABBITT COMO FORMA DE REAPROVEITAMENTO EM MANCAIS DE
TURBINAS HIDRELETRICAS**

**BABBITT METAL AS A FORM OF REUSE IN HYDROELECTRIC TURBINE
BEARINGS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Aldo Przybysz

GUARAPUAVA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

GUILHERME PEREZ GUEDES

**METAL BABBITT COMO FORMA DE REAPROVEITAMENTO EM MANCAIS DE
TURBINAS HIDRELETRICAS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Prof. Dr. Aldo Przybysz

Data de aprovação: 05/julho/2023

Aldo Przybysz

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carla Dantas da Silva

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcos Gonçalves Júnior

Doutorado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

GUARAPUAVA

2023

Este trabalho dedicado a todos que de alguma forma
contribuíram para que eu chegasse até esse
momento no curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meus pais por todo apoio durante o período de graduação, sempre me fornecendo condições para que eu pudesse chegar até aqui e por nunca desistirem dos meus sonhos juntamente comigo.

Ao meu professor e orientador Aldo Przybysz pela contribuição no direcionamento e ensinamentos sobre o tema.

A minha namorada por todo apoio e auxílio durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu querido amigo Dr. Renan Valerio por todo o apoio e ensinamentos sobre desenvolvimento de trabalhos acadêmicos.

A bateria Lobatuque por todo acolhimento e tantos grandes amigos que formei durante todo meu envolvimento com este grupo.

As empresas Tabapower Geradora e Hacker Industrial por todo o conhecimento e materiais fornecidos para o estudo.

A todo o corpo docente da UTFPR que participou da minha formação.

A todos meus colegas de curso.

A Deus.

*“Não me espere para colheita, estarei sempre a
semear”*

RESUMO

O presente trabalho concentrou estudos na avaliação do reaproveitamento do metal patente, uma liga criada por Isaac Babbitt no século XIX que apresenta características antifricção. O metal que dá origem ao estudo faz-se fortemente presente em revestimentos de mancais deslizantes, tendo este trabalho como foco aplicações do revestimento em mancais de plantas de geração hidro energéticas. A manutenção desse tipo de mancal costuma estar compreendida na substituição do metal de revestimento velho por um novo, assim o metal removido é normalmente descartado, acarretando em desperdícios de recursos e financeiro. Para estudo da liga de metal patente a ser reciclada, foram realizados ensaios de compressão e microdureza, além da análise metalográfica. Os resultados obtidos foram comparados com valores da norma ASTM B23 e estudos precedentes sobre metal patente. Após comparações e análises de resultados foi compreendido que o metal reciclado apresentou valores de tensão a compressão mais altos, assim como resultados para microdureza que se mostram-se maiores que os tabelados pela norma ASTM B23. Ainda, na análise de metalografia foi constatada uma deficiência de precipitados SbSn, além de uma estrutura muito mais refinada em detrimento ao metal novo, o que corrobora para resultados de compressão e microdureza maiores.

Palavras-Chave: Metal Patente; Reaproveitamento; Babbitt, Mancal de deslizamento.

ABSTRACT

The present work focused on studying the evaluation of the reuse of Babbitt metal, an alloy created by Isaac Babbitt in the 19th century, which exhibits anti-friction characteristics. The metal under study is heavily used in coatings for sliding bearings, and this research focuses on applying the coating to bearings in hydroelectric power plants. The maintenance of this type of bearing typically involves replacing the old coating with a new one, resulting in the discarded metal, leading to resource and financial waste. To study the recycled Babbitt metal alloy, compression and microhardness tests were performed, along with metallographic analysis. The obtained results were compared with values from ASTM B23 standards and previous studies on Babbitt metal. After comparisons and result analyses, it was found that the recycled metal showed higher compression stress values, as well as higher microhardness results compared to the ones specified in ASTM B23. Furthermore, the metallographic analysis revealed a deficiency of SbSn precipitates, along with a much finer structure compared to the new metal, which supports the higher compression and microhardness results.

Keywords: Patent Metal; Reuse; Babbitt, Sleeve bearing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferentes tipos de rolamentos para esforço radiais	18
Figura 2 – Mancal de deslizamento radial/axial de uma turbomáquina.....	20
Figura 3 – Microestrutura do metal patente MEV, 200X.....	22
Figura 4 – Superfície antes e após decapagem	26
Figura 5 – Lingote de metal patente.....	28
Figura 6 – Cadinho de fundição do metal patente.....	29
Figura 7 – Máquina de fundição por centrifugação	30
Figura 8 – Processo de aspersão térmica.....	32
Figura 9 – Composição do revestimento obtido por aspersão térmica.....	33
Figura 10 – Prensa hidráulica.....	35
Figura 11 – Embutidora metalográfica.....	35
Figura 12 – a) Lixadeiras manuais b) Politriz PL02E.....	36
Figura 13 – Microscópio óptico.....	36
Figura 14 – Microdurômetro	37
Figura 15 – Cavaco de metal patente	38
Figura 16 – Remoção do metal de revestimento por aquecimento.	39
Figura 17 – Dispositivos de fundição.....	40
Figura 18 – Barra de metal reaproveitado	40
Figura 19 – a) Torneamento da barra b) Corpo de prova para ensaio de compressão	41
Figura 20 – Amostras para o ensaio de microdureza	42
Figura 21 – Amostra metalográfica cortada.....	43
Figura 22 – Curva Tensão x Deformação	45
Figura 23 – Amostras de compressão após o ensaio.....	46
Figura 24 – Microestrutura WM-2 e WM-5 500X.....	50
Figura 25 – Metal patente reaproveitado 200X	50
Figura 26 – Metal patente reaproveitado 500X	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição ligas ASTM B 23	23
Tabela 2 – Propriedades mecânicas ligas ASTM B 23	24
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de diferentes materiais de revestimento de mancais de deslizamento	24
Tabela 4 – Valores de Escoamento (Mpa).....	46
Tabela 5 – Valores Tensão última a compressão (Mpa)	47
Tabela 6 – Valores de microdureza para metal patente reaproveitado.....	48
Tabela 7 – Valores de dureza Brinell (HB).....	48

LISTA DE SÍMBOLOS

Cu	Cobre
Sb	Antimônio
Sn	Estanho

LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
SAE	Society of Automotive Engineers
DIN	Deutsches Institut für Normung

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	15
1.1.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	15
2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Mancais	17
2.1.1 Mancais de rolamento	18
2.1.2 Mancais de deslizamento	19
2.2 Metal Patente	21
2.3 Preparação das superfícies	25
2.4.1 Deposição por fundição estática	27
2.4.2 Metalização por centrifugação	29
2.4.3 Aspersão térmica	31
3 METODOLOGIA	34
3.1 Amostragem	37
3.2 Ensaio Mecânicos	41
3.2.1 Ensaio de compressão	41
3.2.2 Ensaio de microdureza	42
3.3 Análise de Metalografia	43
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
4.1 Ensaio de Compressão	45
4.2 Ensaio de Microdureza	47
4.3 Análise Metalográfica	49
5 CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

O funcionamento de turbinas de geração hidro energética dependem diretamente do movimento de rotação de um rotor. Esse elemento, por sua vez, estar acoplado a um eixo, que transmite o movimento para um gerador encarregado de transformar energia mecânica em energia elétrica.

Plantas de geração hidrelétricas apresentam eixos compridos, necessitando de apoio tanto radial quanto axial. Esse apoio é fornecido pelos mancais, que nesse tipo de aplicação, são em grande maioria mancais de deslizamento.

Os mancais de deslizamento se caracterizam pela ausência de elementos rolantes, tendo como princípio de funcionamento o deslizamento do eixo sobre a superfície do próprio mancal, geralmente com auxílio de um fluido lubrificante. Em aplicações como esta, os mancais costumam ser de casquilhos, também conhecidos como bronzinas em outras vertentes da engenharia, ou seja, há dentro da caixa de mancal um elemento mais interno que faz o contato direto com o eixo.

Em máquinas turbo elétricas, os casquilhos são geralmente fabricados em bipartição, facilitando assim os processos de montagem e desmontagem. Esse elemento e, em geral, construído por ligas de aço carbono ou ferro fundido. Além disso, os casquilhos devem ser revestidos internamente por uma fina camada de metal patente, o que faz efetivamente o contato com a superfície do eixo.

O metal patente, metal branco, ou *Babbitt*, é uma liga inicialmente criada para o uso em motores a vapor, por Issac Babbitt, em 1839. Sua composição exata de origem é desconhecida, mas a liga era composta majoritariamente de Estanho (Sn), com adição de Cobre (Cu) e Antimônio (Sb), com respectivos percentuais aproximados: 89,3%; 3,6%; e 7,1% (BRITANNICA, 2011).

Essa liga apresenta baixo ponto de fusão, facilitando a fundição do material tanto para metalização, quanto para a remoção do metal na superfície do casquilho, sem que ocorra a fundição do material que constitui o casquilho.

Logo, na manutenção desse tipo de mancal costuma ser necessário apenas a substituição do metal danificado por um novo, sendo necessário um ou mais processos de usinagem precedendo a fundição do novo metal patente, para obtenção da geometria desejada.

O metal removido costuma ser descartado, de acordo com Almeida (2014), a reciclagem da liga em aplicações com elevadas exigências não é aconselhada, uma vez que as impurezas presentes no material refundido podem influenciar as principais características desse tipo de revestimento, diminuindo assim a capacidade de aderência ao metal base e prejudicando a qualidade da liga, o que torna maior a chance de falhas por fadiga e encurta o tempo de vida útil do casquilho.

A reciclagem de ligas a base de estanho é largamente empregada em aplicações de baixa complexidade, visto seu baixo ponto de fusão, maleabilidade, resistência à corrosão e sua não toxicidade. Desta forma, o metal patente refundido pode seguir outros caminhos, como ligas de solda, folhas de flandres e outros (VEIT, s/d).

Com motivação do estudo da viabilidade de reaproveitamento do metal patente em mancais de plantas hidrelétricas, este trabalho foi feito embasado em comparações feitas entre a liga reciclada e um novo material. Assim, com os resultados obtidos, será possível qualificar a liga reciclada quanto as propriedades esperadas desse tipo de revestimento em mancais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho foi, por procedimentos técnicos, avaliar a viabilidade do reaproveitamento do metal patente reciclado, correlacionando as propriedades mecânicas e microestruturais com um metal patente novo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Usinagem de corpos de prova da liga reciclada;
- Avaliar a composição da liga reciclada por meio de análises de metalografia;
- Realizar ensaios de compressão e microdureza em amostras dos materiais a serem estudados;

- Promover a comparação entre propriedades mecânicas e microestrutura do metal patente novo e do reciclado.

2 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo apresenta os principais conceitos acerca do tema a ser abordado, compreendendo o estudo da liga do metal patente, e também temas correlatos que contribuem para o desenvolvimento e compreensão do estudo, como mancais e seus tipos, processos de metalização e procedimentos para revestimento de substratos com o material em questão.

2.1 Mancais

Por definição, sempre que duas peças têm movimentos relativos entre si, essas constituem um mancal. Na engenharia mecânica, o elemento faz-se presente na grande maioria das máquinas, sempre promovendo sustentação e qualidade de movimento ao eixo (NORTON, 2013).

Mancais apresentam normalmente a rotação como seu único grau de liberdade. Durante esse movimento, ocorre a absorção ou transmissão de forças radiais e/ou axiais (STOETERAU, 1992).

Mancais podem rolar, deslizar ou até mesmo fazer ambos simultaneamente. Esses movimentos geralmente se dão com o auxílio de lubrificantes sólidos, líquidos ou gasosos, que trazem ao mancal diversos efeitos benéficos no coeficiente de atrito da interface (NORTON, 2013).

Esse elemento em um sistema mecânico permite que haja a transferência de carga entre um ou mais corpos, sendo estáticos ou em movimento, e a transmissão de forças ocorre pelo contato entre os materiais rígidos, os quais devem, durante o funcionamento, manter suas propriedades físicas e geométricas (SOUZA, 2017).

Um conjunto de mancais pode ser distinguido conforme a interação entre suas interfaces. Em um mancal plano ou de deslizamento, onde ocorre o esfregamento entre dois materiais, enquanto que um mancal de rolamento detém o uso de elementos rolantes rígidos, esferas e rolos, que rolam em relação aos elementos da interface.

2.1.1 Mancais de rolamento

Um dos elementos de máquinas mais utilizados são os mancais de rolamento, tendo sua aplicação em diversos segmentos da mecânica, presentes em quase todo tipo de máquina (ALCOVER JUNIOR, 2017).

O termo "mancal de rolamento" é empregado para descrever a classe de mancal onde a transferência de cargas é suportada e transferida pelo contato de elementos rolantes no lugar do contato deslizante (CUNHA et al., 2005).

Esses mancais foram desenvolvidos industrialmente ao final do século XIX e vêm desde então tendo atualizações em projetos, diferentes materiais e estudos envolvendo-os, de modo a proporcionar cada vez mais uma maior vida útil, evitando manutenções e falhas (STACHOWIAK; BATCHELOR, 2000).

As superfícies com movimento relativo nesse tipo de mancal são separadas por um elemento rolante, podendo ter o formato esférico, cilíndrico, em forma de barril ou de agulha. Dessa maneira, a deformação elástica que ocorre nos elementos rolantes promove a absorção dos carregamentos (STOETERAU, 1992).

A Figura 1 demonstra um compilado de diferentes tipos de rolamentos, usados em mancais rolantes.



Fonte: Imagem Adaptada NKS (2023).

Mancais de rolamento costumam possuir maiores preços, quando comparados com outros, o que acaba por não viabilizar, em grande parte das situações, o seu uso em equipamentos de grande porte (ALCOVERJUNIOR, 2017).

2.1.2 Mancais de deslizamento

Quando comparados com os mancais vistos na subseção anterior, os mancais de deslizamento apresentam algumas vantagens, como menor tamanho em função do componente a ser suportado, operação mais silenciosa, menor custo de produção, maior rigidez e funcionamento geralmente não limitado à fadiga (OBERG, 2012).

No entanto, também apresentam algumas desvantagens. O atrito entre as superfícies é maior, exigindo mais esforço para que o movimento ocorra, e também podem surgir problemas relacionados à lubrificação, que deve ser mais espessa e contínua. O não cumprimento das técnicas corretas de lubrificação pode resultar na contaminação do fluido e, conseqüentemente, das superfícies de contato, o que pode levar à falha desses componentes em curtos períodos (OBERG, 2012).

No projeto de um mancal de deslizamento, devem ser considerados alguns aspectos de suma importância para a qualidade e durabilidade dele. Entre esses fatores estão a resistência mecânica adequada, usinabilidade (importante no processo de usinagem da geometria e manutenção de tolerâncias), lubricidade, resistência à temperatura e corrosão, e, em alguns casos, nível de porosidade adequado, com o intuito de permitir que a superfície absorva o lubrificante em sua macroestrutura. Além disso, na escolha de materiais, é necessário que o material de revestimento do mancal tenha no máximo um terço da dureza do material que está em movimento, provocando assim a adesão de partículas estranhas (NORTON, 2013).

Os mancais que promovem o contato deslizante entre as superfícies podem ser classificados em três classes gerais: mancais radiais, com a capacidade de sustentação de eixos ou munhões rotativos; mancais axiais, com a função de suportar esforços axiais provenientes de elementos girantes; e mancais guias, que têm a função de guiar a condução de elementos móveis em linha reta (OBERG, 2012).

Os movimentos relativos das superfícies em mancais de deslizamento podem ocorrer das seguintes maneiras (OBERG, 2012):

- 1 Deslizamento puro, sem auxílio de elementos lubrificantes entre as superfícies móveis, como operação a seco de Nylon ou Teflon;

- 2 Com a lubrificação chamada hidrodinâmica, que consiste na criação de uma cunha ou filme de um fluido lubrificante, promovendo assim a separação parcial entre as superfícies em movimento relativo;
- 3 Com lubrificação hidrostática, que consiste na aplicação de uma lubrificação introduzida sob pressão na interface dos elementos de contato, causando uma força contra a carga aplicada e induzindo a separação dos componentes;
- 4 Lubrificação de forma híbrida, compreendendo os processos dos itens 3 e 4.

A Figura 2 mostra um mancal de deslizamento. Esse tipo de mancal apresenta um elevado atrito no movimento de rotação, o que causa instabilidade em baixas rotações. Além disso, o atrito estático é muito maior do que o dinâmico, o que resulta em um grande atrito nas superfícies no momento inicial, quando o movimento ocorre na interface metal-metal, ainda sem o filme de lubrificante entre as superfícies do eixo e do mancal (STOETERAU, 1992).

Figura 2 – Mancal de deslizamento radial/axial de uma turbomáquina.



Fonte: CS Turbinas (s./d.).

A superfície em contato direto com o elemento a ser suportado geralmente é revestida com um material que tem a função de conter o movimento mecânico do sistema. Esse revestimento é projetado para suportar a carga transmitida e fornecer condições adequadas para o movimento relativo. É possível encontrar diferentes

materiais para esse revestimento sólido, como: ligas de cobre, bronze, alumínio, carbono e tungstênio com cromo, níquel, chumbo e estanho (ALMEIDA, 2014).

Um ponto de grande importância na escolha dos materiais é a compatibilidade entre os metais de revestimento do mancal e o material usado para fabricar o substrato ou base. Com a escolha correta dos materiais, é possível evitar tanto o desgaste quanto a corrosão prematuros entre as peças (SALAMONE; STRANO, 2013).

As ligas de estanho são amplamente utilizadas no revestimento de mancais devido às suas propriedades mecânicas, que proporcionam boas condições de deslizamento. (ALCOVERJUNIOR, 2017).

2.2 Metal Patente

Também chamado por Babbitt, o metal que promove o desenvolvimento deste presente estudo foi idealizada por Izacc Babbitt em 1839 e foi empregada inicialmente no uso de motores a vapor, onde ainda se faz presente, tendo estendido seu uso em demais aplicações, como por exemplo, turbomáquinas, turbinas hidrelétricas e geradores (BRITANNICA, 2011).

O metal patente é provavelmente uma das melhores ligas dentre as conhecidas para o revestimento de superfícies de mancais. Ele pode ser encontrado em diversas aplicações, sendo ideal para o uso com eixos de baixa dureza, levando em consideração a boa capacidade de absorção de impurezas pela liga, além de sua excelente compatibilidade com a vizinhança sobre lubrificação (DEAN; EVANS, 1976).

As ligas à base de estanho (Sn) endurecidas com adição de cobre (Cu) e/ou antimônio (Sb) se destacam entre o uso de materiais de antifricção, devido aos baixos coeficientes de atrito. Esses coeficientes ainda podem ser minimizados caso o movimento seja assistido por lubrificação, resultando em níveis de atrito significativamente baixos. Além disso, essa composição apresenta baixa dureza e alta ductilidade (ALCOVER JUNIOR, 2017).

Ainda sobre as propriedades da liga, de acordo com Higgins (1982) as propriedades de deslizamento das ligas podem ser obtidas por meio do uso adequado dos elementos de liga, pois esses devem ser relativamente duros e resistentes ao desgaste. No entanto, também devem apresentar alta tenacidade, boa resistência ao choque e elevada ductilidade, características que não são observadas em ligas

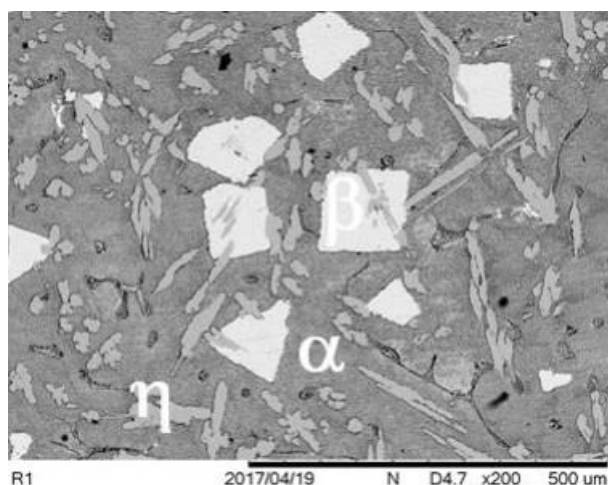
monofásicas. Por esse motivo, são utilizados cobre (Cu) e antimônio (Sb) como elementos endurecedores. O cobre e o antimônio são responsáveis pela formação de compostos intermetálicos que, quando imersos na matriz de estanho, proporcionam melhores propriedades de deslizamento.

Também, Zeren et al. (2007) afirmam que as ligas de metal patente, compostas por estanho e chumbo, além daquelas com adição de antimônio e/ou cobre, apresentam uma boa compatibilidade com lubrificantes, conformabilidade e capacidade de retenção de impurezas, além de níveis satisfatórios de resistência à corrosão. No entanto, essas ligas não apresentam bons resultados em termos de resistência à fadiga, o que limita seu uso em aplicações que envolvem altas rotações.

Com a combinação adequada das propriedades mecânicas de diferentes materiais, é possível obter uma liga na qual as partículas de um composto intermetálico duro estão imersas em uma matriz dúctil. Além disso, é possível utilizar o eutético de sólidos na composição da liga. Assim, a matriz, que é caracterizada por ser macia, desgasta-se, deixando as partículas sólidas livres. Essas partículas soltas na interface do movimento, eixo e mancal criam microcanais que permitem uma circulação de lubrificação com maior fluidez, reduzindo ainda mais o atrito médio do mancal (ALCOVER JUNIOR, 2017).

A microestrutura do metal em questão é apresentada na Figura 3, onde as fases foram identificadas como α , compreendendo a matriz macia composta de estanho, e também β e η , sendo os precipitados de Cu_6Sn_5 e SnSb , respectivamente.

Figura 3 – Microestrutura do metal patente MEV, 200X.



Fonte: Rezende (2019).

De acordo com a norma americana ASTM B-23, as ligas Babbitt são classificadas em dois grandes grupos: "Tin Base" (base de estanho) e "Lead Base" (base de chumbo). Embora a liga de estanho seja mais cara, geralmente é preferida em relação à segunda devido à sua excelente resistência à corrosão, boa aderência e menor tendência à segregação, evitando assim o deslocamento de partes do revestimento no mancal durante o serviço (ZEREN et al., 2007).

O referenciamento das ligas de metal patente pode ser encontrado em normas como as mencionadas abaixo, que fornecem classificações sobre o metal, bem como informações sobre composição química, propriedades mecânicas e procedimentos de inspeção e testes:

- ASTM B-23 (American Testing Materials);
- QQ-T-390A (Especificações do Governo dos EUA);
- SAE J460 (Society of Automotive Engineers); e
- DIN ISO 4381 (Deutsches Institut für Normung and International Organization for Standardization).

As Tabelas 1 e 2 mostra algumas propriedades e composições da liga de metal patente a base de Estanho identificadas pela norma ASTM B23.

Tabela 1 – Composição ligas ASTM B23.

Número de liga	Composição nominal (%)		
	Estanho	Antimônio	Cobre
1	91,0	4,5	4,5
2	89,0	7,5	3,5
3	84,0	8,0	8,0

Fonte: Adaptado ASTM B23 (2009).

Tabela 2 – Propriedades mecânicas ligas ASTM B23.

Número de liga	Tensão de Escoamento (Mpa)		Tensão última a compressão (Mpa)		Dureza Brinell (HB)	
	20°C	100°C	20°C	100°C	20°C	100°C
1	91,0	4,5	88,6	47,9	17,0	8,0
2	89,0	7,5	102,7	60,0	24,5	12,0
3	84,0	8,0	121,3	68,3	27,0	14,5

Fonte: Adaptado ASTM B23 (2009).

A dureza da liga pode ser aumentada com a adição de Sb (antimônio) e Cu (cobre), porém, isso pode diminuir a ductilidade da liga. Além disso, baixos teores de antimônio (3-7%) e cobre (2-4%) conferem máxima resistência a trincas por fadiga, uma vez que a composição se torna mais macia. No entanto, essa maior maciez pode comprometer os níveis de resistência e compressão (ZEREN et al., 2007).

A Tabela 3 mostra algumas das principais propriedades do revestimento de metal patente e suas influências durante a operação do mancal metalizado com esse tipo de material.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas de diferentes materiais de revestimento de mancais de deslizamento.

Propriedades físicas	Característica da propriedade no serviço do mancal	Características dos materiais utilizados		
		Metal Patente	Ligas à base de Cobre	Ligas à base de alumínio
Resistência à fadiga	Suportar esforços unilaterais	Adequado para muitas aplicações, tendo seu uso restrigido em altas temperaturas	Usadas em diversas aplicações, podendo ter sua resistência variada em função da sua composição	Similar às ligas de cobre, podem ter suas propriedades adequadas de acordo com a composição da liga
Resistência à compressão	Suportar o carregamento sem extrusão ou alterações dimensionais	Como acima	Como acima	Como acima
Capacidade de adesão	Tolerar adesão de partículas presentes em lubrificantes contaminados, assim diminuindo o desgaste do mancal	Excelente capacidade de adesão, melhor que qualquer outro material de revestimento	Inferior às propriedades dos metais Babbitt.	Inferior às propriedades dos metais Babbitt.
Conformabilidade	Tolerar pequenos desalinhamentos e deflexão do mancal sobre carga.			
Compatibilidade	Tolerar uso de lubrificação e o contato metal - metal na partida do movimento			
Resistência à corrosão	Resistir ao ataque e contaminação por produtos ácidos, água e/ou refrigerante do lubrificante.	Base de Sn: Excelente na ausência de água do mar. Base de Pb: Atacados por produtos ácidos	Suscetível ao ataque na presença de Pb. Resistência aumentada pelo Pb-Sn	Excelente resistência à corrosão

Fonte: Adaptada ZEREN et al. (2007).

2.3 Preparação das superfícies

A fabricação adequada de um mancal de metal patente proporciona uma forte e contínua ligação com o material base, também chamado de substrato. Portanto, antes do processo de deposição do metal patente, a superfície que receberá o revestimento deve ser devidamente tratada, garantindo uma maior adesão entre o casquilho e o metal do revestimento, além de maior eficácia na deposição (ALMEIDA, 2014; CLAUSEN, 2012).

Podem ser utilizados métodos químicos, físicos e/ou eletroquímicos para o revestimento do suporte, podendo ser aplicados em combinação para obter sucesso nos tratamentos subsequentes (CLAUSEN, 2012).

Em qualquer caso de deposição, é necessário realizar o aquecimento da superfície até temperaturas específicas, antes de contaminá-la (CLAUSEN, 2012).

A preparação da superfície começa com a limpeza, seguida por procedimentos desengordurantes. Na limpeza, pode-se realizar usinagem ou

jateamento de granalha de aço. No desgorduramento, são utilizados solventes orgânicos ou soluções aquosas contendo sais alcalinos e aditivos para remover resíduos de óleo, graxa e quaisquer camadas de sujeira ou matéria orgânica, a fim de melhorar o contato com o metal de revestimento (CLAUSEN, 2012).

O processo de desgorduramento é geralmente seguido pela decapagem, que permite a remoção de camadas de óxidos provenientes dos processos de fabricação do material base, como laminação e tratamentos térmicos. Esse processo pode ser realizado mecanicamente, eletroquimicamente ou quimicamente, sendo a última opção a mais comum (CLAUSEN, 2012; DOMINGUES, 2015).

A decapagem química, mostrada na Figura 4, envolve a imersão da peça em soluções ácidas, como ácido sulfúrico, clorídrico e nítrico, que promovem a remoção de carepas e compostos de óxidos do material base. O tempo de imersão varia de 5 a 30 minutos, dependendo do estado da superfície (CLAUSEN, 2012).

Figura 4 – Superfície antes e após decapagem.



Fonte: SELBER TRATAMENTO (2022).

Vassilaros (1976) mencionou procedimentos para obter uma forte ligação entre o revestimento e o aço da base na fabricação de novos rolamentos de metal patente. Os passos são os seguintes:

- Jatear com jato abrasivo de areia para remoção de toda oxidação presente na superfície;

- Desengordurar a superfície com acetona;
- Imersão da base em uma solução de ZnCl₂; e
- Banho em estanho a 315°C por 1 minuto.

Ainda em casos em que as dimensões da peça impossibilitam a imersão, deve-se aquecer o substrato de aço com um maçarico enquanto ocorre a aplicação da solução de ZnCl₂ e também a fusão de estanho sobre a face que receberá o metal patente (VASSILAROS, 1976).

Como já citado, na última etapa da preparação, a base do mancal passa pela estanhagem, que consiste na aplicação de estanho puro sobre a superfície a uma temperatura de 300-350°C (CLAUSEN, 2012).

2.4 Processos de deposição

A deposição do metal patente pode ocorrer de diferentes maneiras, levando em conta as características e resultados de cada processo. O método correto pode ser selecionado de acordo com as necessidades e especificações do projeto. A deposição por aspensão, metalização por centrifugação e fundição estática são os métodos mais utilizados na produção dos revestimentos.

2.4.1 Deposição por fundição estática

Também chamado de metalização por gravidade, esse método consiste no vazamento do metal fundido sobre a superfície de forma manual. Ele se destaca pela baixa complexidade, baixo custo de operação e versatilidade em relação à geometria do mancal (ALCOVER JUNIOR, 2017).

O material de revestimento é comprado em lingotes, como mostrado na Figura 5, e fundido em cadinhos até que atinja seu ponto de fusão total.

Figura 5 – Lingote de metal patente.



Fonte: Tabapower (2022).

Esse tipo de metalização costuma produzir revestimentos que apresentam maior porosidade e oxidação quando comparados a outros métodos. Além disso, a aderência ao substrato também fica por vezes prejudicada. Esses defeitos ocorrem devido à não homogeneidade do resfriamento da peça, visto que esse processo costuma ser manual e em ambientes não controlados (ALCOVER JUNIOR, 2017).

O vazamento é realizado em uma coquilha acoplada ao substrato, com dimensões desejadas, geralmente levando em conta o sobremetal para posteriores processos de usinagem, ou até mesmo em aplicações de baixa complexidade, a geometria final da peça. Durante o procedimento, o metal totalmente fundido deve ser despejado uniformemente sobre toda a superfície do substrato, que é (ALCOVER JUNIOR, 2017).

A Figura 6, mostra um modelo simples de cadinho usado para a fundição e vazamento desse tipo de revestimento.

Figura 6 – Cadinho de fundição do metal patente.



Fonte: Tabapower (2022).

2.4.2 Metalização por centrifugação

Esse processo consiste na centrifugação do metal patente fundido de modo uniforme, enquanto o substrato é preso a algum dispositivo que realiza o movimento de rotação em torno de seu próprio eixo. Dessa maneira, a deposição ocorre de forma mais homogênea do que no processo citado na subseção anterior (ALMEIDA, 2014).

É possível encontrar alguns dispositivos desenvolvidos especificamente para essa operação, como o mostrado na Figura 7. Em alguns casos, também são utilizados mecanismos acoplados a um torno mecânico.

Figura 7 – Máquina de fundição por centrifugação.



Fonte: METSA INDUSTRIAL (2022).

Durante o movimento de rotação, o componente a ser revestido deve estar alinhado e centrado, garantindo assim que a camada de revestimento de metal patente seja formada de maneira simétrica e uniforme sobre a superfície do substrato (ALMEIDA, 2014).

Quando comparado com a deposição por gravidade, este método apresenta um resultado mais uniforme e consistente, uma vez que, devido ao movimento da peça base, o metal fundido exerce pressão sobre a superfície do mancal, resultando em uma solidificação com baixa porosidade e alta aderência (REZENDE, 2019).

Nesse processo, as formas cilíndricas recebem o vazamento do material fundido por um canal que o leva até o centro de rotação da peça. Devido ao movimento, o tempo de solidificação do metal é reduzido, melhorando assim suas propriedades mecânicas (REZENDE, 2019).

As propriedades obtidas dependem de alguns fatores durante o processo, tais como:

- Temperatura de processamento: deve-se manter a temperatura baixa, próxima ao ponto de fusão da liga, a fim de evitar a segregação e variação na composição;
- Vazamento da liga: varia de acordo com o tamanho da peça a ser revestida e o tipo de liga utilizada;

- Velocidade de rotação: de suma importância no processo, pois a escolha errada da velocidade pode afetar os níveis de aderência e a taxa de solidificação. Em casos de velocidade muito baixa, pode ocorrer baixa aderência e taxa de solidificação inadequada, enquanto velocidades muito altas podem resultar em porosidade e baixa aderência devido à rápida solidificação;
- Solidificação: é condicionada pela temperatura inicial do processo (da peça e do metal patente), velocidade de rotação e espessura tanto da peça quanto do revestimento.

Quanto às suas limitações, pode-se apontar a complexidade de operação, a necessidade de dispositivos específicos e suas restrições dimensionais, limitando seu uso apenas para obtenção de geometrias cilíndricas (ALCOVERJUNIOR, 2017).

2.4.3 Aspersão térmica

Esse processo pode ocorrer com materiais cerâmicos, polímeros e metálicos, estando em estado fundido ou semifundido. As ligas a serem utilizadas apresentam-se na forma de arame, geralmente empregado em usos de baixa temperatura (no máximo 250°C), ou pó, utilizado em aplicações com temperaturas mais elevadas, variando entre 800 e 1100°C (ALMEIDA, 2014).

Na aspersão, o material de revestimento recebe calor por meio químico ou elétrico, sendo impulsionado por uma fonte de ar comprimido ou outros gases na direção da superfície previamente preparada, aderindo a ela por mecanismos de natureza mecânica. Esse processo é demonstrado na Figura 8. Dessa forma, pela sobreposição, são formadas camadas espessas e calculáveis para uma determinada quantidade de material (ALCOVERJUNIOR, 2017).

Figura 8 – Processo de aspersão térmica.



Fonte: Lima (2007).

A qualidade obtida dependerá de alguns fatores importantes no momento da aplicação do revestimento, como temperatura, tipo de fonte de calor e velocidade imposta às partículas.

Quando comparado com os processos de deposição anteriormente mencionados, este apresenta algumas vantagens, tais como:

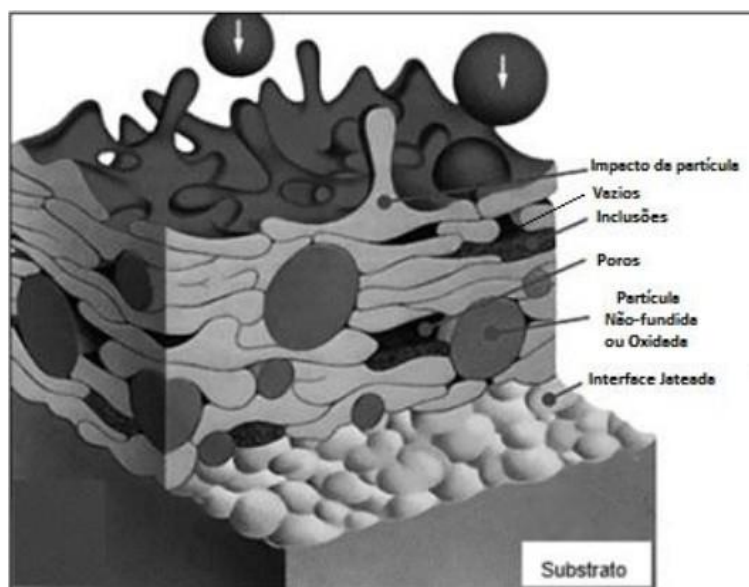
- Versatilidade: o revestimento pode ser aplicado em qualquer superfície, independentemente de sua geometria;
- Tamanho das peças: a deposição pode ocorrer em peças de qualquer tamanho;
- Características técnicas: embora o revestimento produzido por esse procedimento apresente um coeficiente de atrito levemente mais elevado, ele possui uma vida útil superior quando comparado com outras formas de deposição.

A estrutura de um revestimento realizado por aspersão é formada pela deposição de lamelas sobrepostas, resultantes do espalhamento do material sobre a superfície do substrato, além de poros e óxidos entre algumas camadas. Isso torna o material menos macio e proporciona menor usinabilidade quando comparado ao revestimento obtido por outros processos (ALCOVERJUNIOR, 2017).

A microestrutura de um revestimento feito por aspersão, apresenta uma microestrutura composta por alguns vazios, poros, inclusões entre as partículas do

metal patente. A Figura 9 é uma ilustração que mostra como são formados os revestimentos por esta forma de metalização.

Figura 9 – Composição do revestimento obtido por aspersão térmica.



Fonte: Marques (2003).

Além da porosidade, a presença dos óxidos entre as lamelas é característica de revestimentos aspergidos. Os óxidos são formados pela reação do metal com o oxigênio e podem ser intralamelares, presentes no interior das lamelas, e interlamelares, ao redor das lamelas podendo influenciar a composição das fases, microestrutura e propriedades, e conseqüentemente, a performance do revestimento (ALCOVERJUNIOR, 2017).

A presença de óxidos traz alterações significantes em relação aos materiais sólidos, dessa forma, uma elevada concentração pode reduzir a tenacidade, ductilidade e conformabilidade, sendo essas importantes propriedades de um revestimento deste tipo (ALCOVERJUNIOR, 2017).

Revestimentos obtidos por aspersão costumam apresentar porosidade superior em detrimento às formas vistas anteriormente, além disso a metalização por esse processo gera revestimentos com maior refino de estrutural o que resulta em menor desgaste do metal patente (ALCOVERJUNIOR, 2017).

3 METODOLOGIA

Com a motivação de reaproveitar o metal patente utilizado na fabricação de novos mancais ou na reforma de mancais deslizantes em usinas hidrelétricas, este trabalho consiste no estudo das propriedades mecânicas e análises micrográficas, visando comparar os resultados obtidos com o metal reaproveitado com valores de estudos anteriores e normas relacionadas ao metal patente.

Para a análise dessas propriedades, são necessários alguns passos que garantirão que o material adquira geometrias adequadas para ensaios mecânicos e tenha superfícies bem-acabadas e polidas para análises metalográficas.

Todo o material utilizado no estudo foi fornecido pela Hacker Industrial, uma empresa especializada em geração de energia e fabricação de equipamentos para usinas hidrelétricas de pequeno porte (PCHs) e centrais geradoras hidrelétricas (CGHs). Para as análises realizadas, foi utilizada a liga de metal reciclado de mancais recebidos pela fábrica para reforma, além de todos os cavacos provenientes da usinagem do metal patente na fábrica.

Para a realização dos procedimentos necessários, foram utilizados os laboratórios da UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), campus Guarapuava, devido a toda a sua estrutura para a elaboração de ensaios e a prática de processos de usinagem, além do conhecimento e apoio dos técnicos de laboratório e professores em todos os processos.

Para obtenção dos corpos de prova, foi realizado no laboratório de usinagem o torneamento e corte da barra bruta. Esses procedimentos foram executados no torno Nardini Mascote.

No laboratório de materiais do campus foram realizados os ensaios de compressão e toda a parte a parte da metalografia do metal patente.

O ensaio de compressão foi realizado na prensa hidráulica EMIC GR048 (Figura 10), que estava conectada a um computador com o software Tesc.

Figura 10 – Prensa hidráulica.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

As amostra para análise metalográfica foram embutidas a quente na embutidora EM30D (Figura 11), depois foram lixadas e polidas nas lixadeiras manuais e politriz PL02E (Figura 12).

Figura 11 – Embutidora metalográfica.



Fonte: Aatoria Própria (2023).

Figura 12 – a) Lixadeiras manuais b) Politriz PL02E.



a)

b)

Fonte: Autoria Própria (2023).

Ao final, as amostras polidas foram analisadas no microscópio óptico Olympus U-AN360-3 (Figura 13).

Figura 13 – Microscópio Óptico.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Além desses, também foi usado o laboratório de metrologia, onde fica o microdurômetro DIGIMESS 400.310 (Figura 14) que foi usado para medições de microdureza do metal patente reciclado.

Figura 14 – Microdurômetro.



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.1 Amostragem

Todo o metal patente descartado recolhido na empresa, proveniente de diversas formas, é armazenado no setor de metalização da empresa. Em sua grande maioria, o metal costuma se apresentar na forma de cavacos (Figura 15) sendo essa a forma mais rápida de remover o revestimento de mancais recebidos na fábrica para restauração. Além disso, há uma grande quantidade de cavacos resultantes dos processos de usinagem de mancais e sapatas axiais, visando obter geometrias finais.

Figura 15 – Cavaco de metal patente.



Fonte: Hacker Industrial (2023).

Em alguns casos, os revestimentos também podem ser removidos aquecendo-os até as temperaturas de fusão do metal. Dessa forma, o metal é derretido e os resíduos de metal patente na superfície de aderência são raspados para remoção, conforme mostrado na Figura 16.

Figura 16 – Remoção do metal de revestimento por aquecimento.



Fonte: Hacker Industrial (2023).

Após ser coletado na empresa, o metal de descarte é fundido no setor de metalização, utilizando cadinhos comuns. O aquecimento da liga é realizado com gás, e a temperatura do processo não é controlada, sendo elevada apenas a níveis que promovem a completa liquefação do material. A mistura é então despejada sobre uma forma feita com cantoneiras comerciais. Além disso, durante o despejo, o metal derretido passa por uma peneira para retenção de resíduos. Os dispositivos utilizados nesse processo estão representados na Figura 17.

Figura 17 – Dispositivos de fundição.



Fonte: Hacker Industrial (2023).

O resfriamento ocorre de forma natural. Após a completa solidificação da liga, a barra pode ser removida do dispositivo, resultando na barra apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Barra de metal reaproveitado.



Fonte: Hacker Industrial (2023).

3.2 Ensaios Mecânicos

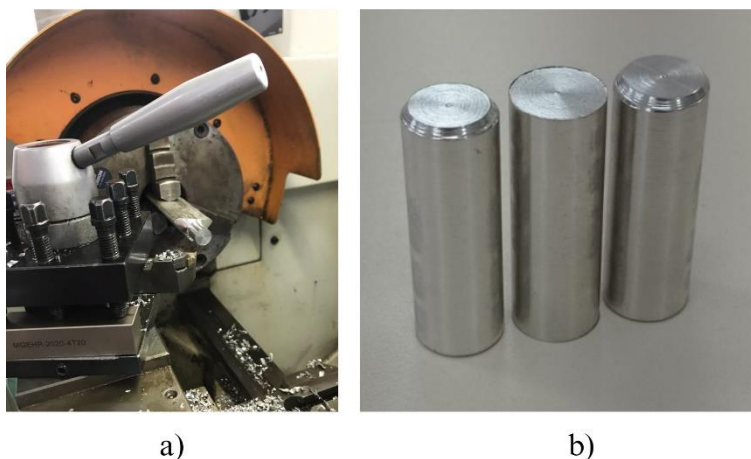
A viabilização e qualidade do material para reutilização em mancais de plantas hidrelétricas ocorre inicialmente a partir do estudo das propriedades mecânicas deste. Levando isso em conta, foram realizados os ensaios de microdureza e compressão, que fornecem resultados importantes em relação às propriedades esperadas de um revestimento.

Além disso, também foi realizada uma análise metalográfica do material, permitindo a análise da microestrutura da liga de metal patente de reaproveitamento e possibilitando comparações com normas e estudos anteriores.

3.2.1 Ensaio de compressão

Os corpos de prova foram torneados com as dimensões de 12,7 mm de diâmetro e 38,1 mm de comprimento, conforme especificado na norma ASTM B23 (Standard Specification for White Metal Bearing Alloys). O procedimento e a geometria final das amostras podem ser visualizados nas Figuras 19 a) e b) consecutivamente.

Figura 19 – a) Torneamento da barra b) Corpo de prova para ensaio de compressão.



a)

b)

Fonte: Autoria Própria (2023).

Com auxílio do software Tesc, foi possível obter os dados relativos ao ensaio de compressão realizado na prensa hidráulica. O procedimento foi limitado pela deformação do corpo de prova, onde a força era aplicada até que houvesse uma

redução de 15 milímetros no seu comprimento, valor pouco acima da deformação onde é aferida a tensão última a compressão.

A tensão de escoamento foi encontrada pela curva Tensão X Deformação, na transição do regime elástico para o plástico de deformação, já a tensão última foi obtida pelo valor na deformação de 25% do corpo de prova (9,52 mm), assim como consta na norma ASTM B23.

3.2.2 Ensaio de microdureza

Os procedimentos adotados para este ensaio seguem as diretrizes da norma ASTM E384, que estabelece métodos para a realização de ensaios de microdureza em materiais.

Para a amostragem foram cortadas três lâminas com aproximadamente 4 milímetros de espessura a partir da barra de metal reciclada (Figura 18). O corte foi realizado no torno o mesmo utilizado para a confecção dos corpos de prova.

A microdureza foi medida em pontos distribuídos aleatoriamente sobre a superfície das amostras (Figura 20). Para as medições, foi utilizado o penetrador padrão para ensaios de microdureza Vickers, que possui uma forma piramidal de base quadrada com uma angulação de 136° entre as faces da ponta. A pré-carga adotada foi de 0,01 kgf, a menor disponível no equipamento, devido ao material em questão possuir uma baixa microdureza em comparação com outras ligas.

Figura 20 – Amostras para o ensaio de microdureza



Fonte: Autoria Própria (2023).

3.3 Análise de Metalografia

Na preparação da amostra para essa análise a barra fundida (Figura 18) foi torneada e cortada, assumindo a forma de uma pequena fatia cilíndrica, com 12,7 mm de diâmetro conforme ilustrado na Figura 21.

Figura 21 – Amostra metalográfica cortada.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Posteriormente, a amostra foi embutida a quente. Para o processo, foi utilizada resina granulada de baquelite a uma temperatura de 120°C e uma pressão de 100 kgf/cm².

Após o embutimento, as amostras seguiram para o processo de lixamento, onde foram utilizadas lixas nas seguintes granulometrias: 220, 400, 600, 1200.

O lixamento nas três primeiras granulometrias foi realizado nas lixas manuais, sempre em sentidos uniformes. A cada avanço para a próxima lixa, ou seja, de menor granulometria, foi feito o lixamento no sentido perpendicular ao anterior. Assim, ao final de cada etapa de lixamento, a amostra era levada ao microscópio óptico (Figura 13) para verificar os sentidos e a conformidade dos riscos, garantindo a ausência de imperfeições das lixas anteriores.

O lixamento com a granulometria de 1200 foi realizado na politriz, utilizando a lixa apropriada e sempre utilizando água durante o processo. Posteriormente, as amostras passaram pelo processo de polimento. Foi utilizado um pano específico para polimento metalográfico e alumina (0,2 micrômetros) como fluido para otimizar o acabamento da amostra.

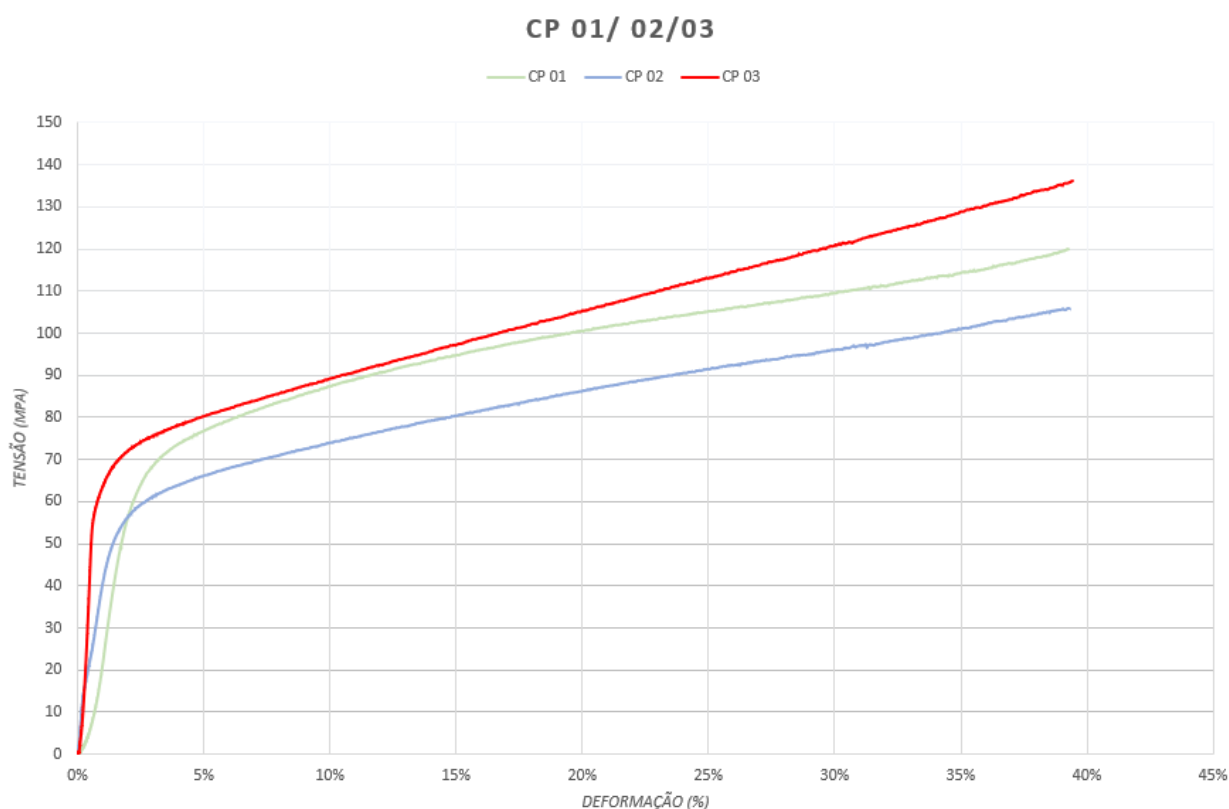
Ao final, as amostras foram atacadas quimicamente com o reagente Nital 2% por 1 segundo, permitindo a revelação da microestrutura típica do metal patente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaio de Compressão

A Figura 22 apresenta as curvas de engenharia de Deformação(mm) x Tensão(%) obtidas pelo ensaio de compressão realizado nos corpos de prova cilíndricos do metal patente reciclado.

Figura 22 – Curva Tensão x Deformação.



Fonte: Autoria Própria (2023).

As curvas são referentes aos 3 corpos de prova (CP 01, CP 02, CP 03) e apresentam silhuetas semelhantes. É possível notar uma diferença nos pontos de escoamento, ou seja, o momento em que o material deixa de se deformar elasticamente e passa a ter sua deformação plástica. Enquanto nos corpos CP 01 e CP 03 o material escoar em aproximadamente 55 MPa de tensão, a amostra CP 02 apresenta esses valores na faixa de 48 MPa, resultando em uma redução de

aproximadamente 13% no valor. A Figura 23 mostra os corpos de prova após o ensaio de compressão.

Figura 23 – Amostras de compressão após o ensaio.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Como os corpos foram usinados e cortados da barra consecutivamente de acordo com seus respectivos números, é possível observar uma não linearidade nos valores encontrados para tensão de escoamento em compressão, visto que a amostra CP 02, localizada entre as outras duas, apresenta valores relativamente abaixo das amostra CP 01 e 03.

Como não foi possível obter a composição exata da liga do material dos corpos de prova, visto que é proveniente de todo tipo de resíduo de metal patente da empresa, os resultados serão comparados com valores de resistência de ensaios similares encontrados na bibliografia em geral, sem a escolha de uma composição específica.

A Tabela 4 compara valores obtidos para tensão de escoamento entre as amostra ensaiadas e as composições 1, 2 e 3 da ASTM B 23.

Tabela 4 – Valores de Escoamento (Mpa).

Metal Reciclado	ASTM B 23
CP 01 – 55 Mpa	Liga1 – 30,3 Mpa
CP 02 – 48 Mpa	Liga2 – 42,1 Mpa
CP 03 – 55 Mpa	Liga3 – 45,5 Mpa

Fonte: Autoria Própria (2023).

Ainda segundo a ASTM B 23, os valores para tensão última à compressão são medidos na deformação de 25% do corpo de prova cilíndrico. A Tabela 5 compara valores de tensão última obtidos para CP 01, 02 e 03 com valores presentes na norma ASTM B23.

Tabela 5 – Valores Tensão última a compressão (Mpa).

Metal Reciclado	ASTM B 23
CP 01 – 105,1 Mpa	Liga1 – 88,6 Mpa
CP 02 – 91,5 Mpa	Liga2 – 102,7 Mpa
CP 03 – 113,2 Mpa	Liga3 – 121,3 Mpa

Fonte: Autoria Própria (2023).

Assim, os valores encontrados para escoamento mostram-se sempre maiores, enquanto os valores de tensão última a compressão estão dentro faixa de valores esperados, levando em conta dados da norma ASTM B23.

4.2 Ensaio de Microdureza

O ensaio de microdureza foi realizado no metal reciclado em um total de 8 pontos distribuídos aleatoriamente entre as amostras apresentadas na Figura 20. Os resultados obtidos no experimento foram registrados na Tabela 6. A unidade medida pelo microdurômetro é na escala Vickers (HV), e a tabela apresenta, na coluna à direita, valores em dureza Brinell (HB), convertidos para facilitar comparações com medidas encontradas na literatura.

Tabela 6 – Valores de microdureza para metal patente reaproveitado.

Dureza Vicker (HV)	Dureza Brinell (HB)
38	36
43	40
33	32
33	32
31	30
40	38
34	33

Fonte: Aatoria Própria (2023).

Os valores de microdureza encontrados situaram-se aproximadamente entre 31 e 52 HV, os quais, quando convertidos para dureza Brinell, correspondem à faixa de 30 a 50 HB. Verificou-se que as amostras do metal apresentaram valores elevados de dureza quando comparados aos valores das ligas desse tipo especificados na norma ASTM B 23, os valores são comparados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores de dureza Brinell (HB).

Metal reciclado	ASTM B23
38	
43	Liga1 – 17
33	
33	Liga2 – 24,5
31	
40	Liga3 – 27,0
34	

Fonte: Aatoria Própria (2023).

A dureza do material é diretamente influenciada por sua composição, e observa-se que as designações que possuem maiores percentuais de Cu e Sb apresentam valores mais elevados de dureza, como é o caso da liga número 3 mencionada anteriormente com composições demonstradas na Tabela 1.

Os valores obtidos para o metal reciclado são sempre superiores aos das ligas mencionadas na norma ASTM B 23, estando pelo menos 10% acima desses valores.

A análise metalográfica no metal reciclado demonstrada na subseção posterior apresenta uma microestrutura mais refinada em detrimento ao metal novo visto em estudos precedentes, dessa forma apresentando número maior de contornos de grãos o que dificulta discordâncias, resultando assim em um aumento da dureza apresentado.

4.3 Análise Metalográfica

Com o conhecimento das fases da microestrutura do metal em questão, agora será necessário analisar sua distribuição nas imagens obtidas pela microscopia óptica realizada. Para uma melhor compreensão dos elementos, segue abaixo uma breve revisão bibliográfica.

As ligas de metal patente à base de estanho contêm entre 3% e 8% de cobre (Cu) e 5% a 8% de antimônio (Sb). Microestruturalmente, são compostas por uma matriz sólida e macia de estanho e antimônio, além de intermetálicos duros de Cu_6Sn_5 , que se apresentam na forma de finas agulhas ou estrelas, bem como cuboides constituídos de $SbSn$ quando as concentrações de antimônio na liga estão acima de 7,5%. (ZEREN et al., 2007).

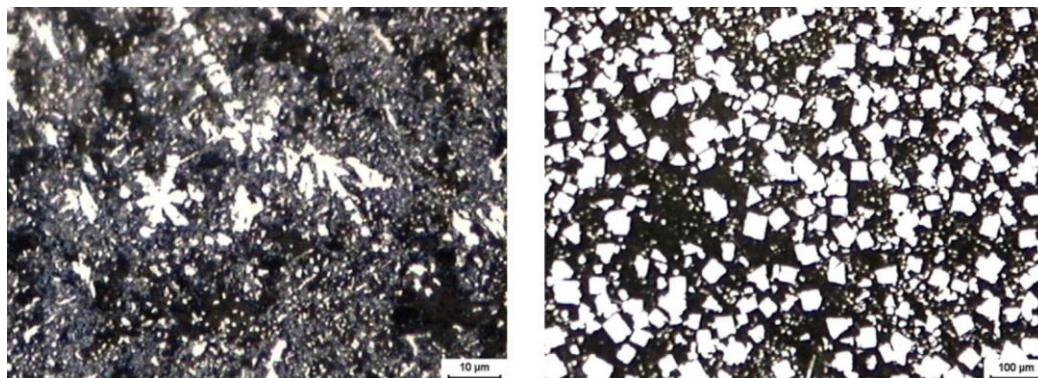
Em ligas com teores de antimônio acima de 9% e cobre acima de 2% (ou mais), formam-se cuboides de $SbSn$, normalmente nucleados pelas agulhas de Cu_6Sn_5 , que aparecem embutidos dentro e/ou atravessando os cuboides de $SbSn$. (ZEREN et al., 2007).

Portanto, o aumento do teor de cobre na liga resultará em uma maior frequência de intermetálicos agulhados na microestrutura do material. O mesmo ocorre com a adição de antimônio na liga, proporcionando um maior número de cuboides dispersos na matriz do metal patente (KHONSARI; BOOSER, 2017; ALMEIDA, 2014).

Zeren et al. (2007) realizaram um estudo nas ligas WM-2 (Sb 7,2%, Cu 3,03%) e WM-5 (Sb 20,25%, Cu 2,66%), sendo a primeira com baixa concentração de antimônio, inferior a 7,5%, e a segunda com percentuais aproximados de 20,2% desse mesmo componente. A Figura 24 demonstra os resultados obtidos por eles na

microscopia óptica das duas amostras. Ambas as classes de ligas apresentam concentrações de cobre entre 2,5% e 3%.

Figura 24 – Microestrutura WM-2 e WM-5 500X.

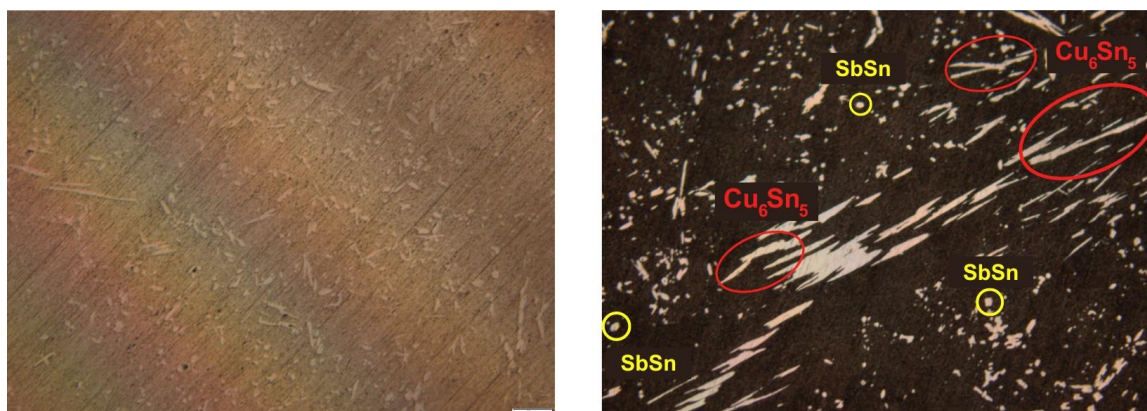


Fonte: ZEREN et al. (2007).

As análises realizadas apresentam, em sua maior parte, ausência ou pouca presença dos intermetálicos $SbSn$, os quais aparecem em tamanhos reduzidos. Enquanto isso, as agulhas de Cu_6Sn_5 estão presentes em toda a extensão da superfície do metal, com concentrações intensas em alguns pontos específicos. Isso indica que o material em questão possui concentrações de Sb abaixo de 7,5% e um teor relativamente alto de cobre, como evidenciado pela grande quantidade de precipitados de Cu_6Sn_5 .

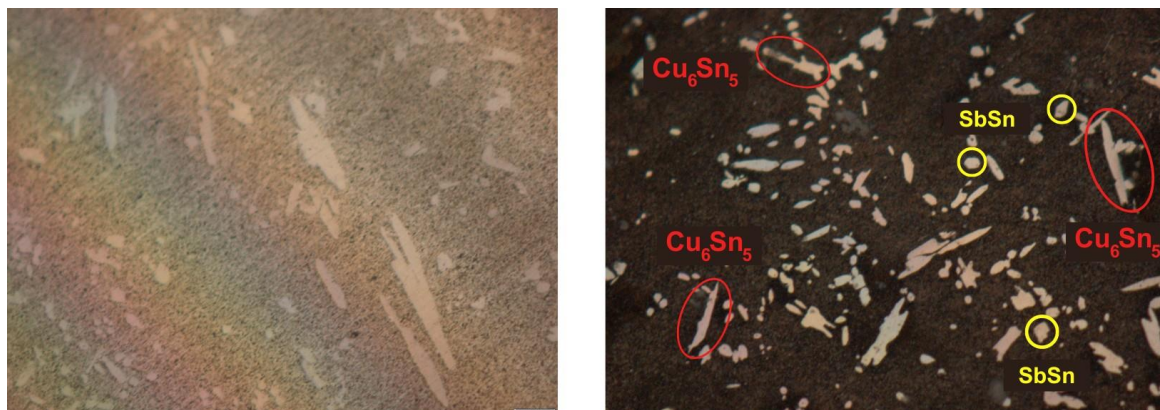
As Figuras 25 e 26 mostram a microestrutura obtida durante o ensaio de microscopia óptica, com imagens da superfície antes e após o ataque com o reagente Nital 2%, permitindo a observação das diferentes fases em ambos os casos.

Figura 25 – Metal patente reaproveitado 200X.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Figura 26 – Metal patente reaproveitado 500X.



Fonte: Autoria Própria (2023).

Quando comparadas com a Figura 3, as análises realizadas comprovam o refinamento do material reciclado em detrimento ao metal novo, o que corrobora aumento de contorno de grãos tornando assim maiores a resistência a compressão e valores de dureza desse tipo de material.

5 CONCLUSÃO

O ensaio de compressão no material apresentou valores sempre maiores para o limite de escoamento, quando comparados com os encontrados no ASM Handbook para designações de liga ASTM B 23 e SAE. Quando comparado com as designações, o material de reaproveitamento apresenta valores mais próximos de ligas com maiores concentrações de Sb, como ligas 2 e 3 da ASTM B23 (Tabela 1). A mesma proximidade com designações de maior teor de elementos endurecedores foi notada no ensaio de microdureza, onde valores entre 31 e 52 HV (30 e 50 HB) indicam que a liga reaproveitada possui valores maiores do que os encontrados em materiais e estudos anteriores.

A análise da microestrutura do material, por sua vez, mostra uma liga repleta de precipitados em forma de agulha (Cu_6Sn_5), indicando que o metal de reaproveitamento mostra uma grande concentração relativa de Cu. Em contrapartida, cuboides (SbSn) quase não foram encontrados na composição do metal, o que aponta para uma liga com baixas concentrações de Sb, concentração essa que pode ter sido reduzida pelo aquecimento excessivo na fundição para confecção das barras. Além disso, a microestrutura do metal reciclado mostrou-se bem mais refinada, o que forma maior número de contorno de grãos, dificultando discordâncias internas o que contribui para aumento dos valores de microdureza e compressão analisados.

Portanto, a liga reaproveitada apresentou valores acima do esperado para ensaios de microdureza e compressão, o que pode acarretar no aumento de tensões de trabalho, aumento de atrito e conseqüentemente perdas de potência. Assim faz-se necessário continuação do estudo dessas propriedades em trabalho para saber o quanto essa elevação de resistência pode afetar o funcionamento de mancais produzidos com metal reciclado.

REFERÊNCIAS

ALCOVERJUNIOR, P. R. C. **Microestrutura, propriedades mecânicas e tribológicas de metal patente depositado por aspersão térmica**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.

ALMEIDA, J. P. P. **Revestimento de Chumaceiras com Ligas à Base de Estanho**: caracterização da interface e estudo da adesão do revestimento ao substrato. Tese (Doutorado), 2014.

BRITANNICA, E. **Babbitt metal**. set. 2011. Disponível em: <https://www.britannica.com/technology/babbitt-metal>.

CLAUSEN, A. L. **Estudo do processo de metalização por centrifugação de metal patente à base de estanho em capas de aço**. Dissertação (B.S. thesis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

CUNHA, L. B. et al. **Elementos de máquinas**. [S.I.]: LTC, 2005.

DEAN, R.; EVANS, C. Plain bearing materials: the role of tin. *TRIBOLOGY international*, Elsevier, v. 9, n. 3, p. 101–108, 1976.

DOMINGUES, D. F. **Otimização do processo de decapagem química numa empresa de produção de perfis de aço**. Tese (Doutorado) – Universidade de Coimbra, 2015.

KHONSARI, M. M.; BOOSER, E. R. **Applied tribology**: bearing design and lubrication. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2017.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas**. [S.I.]: Bookman editora, 2013.

BERG, E. **Machinery's Handbook**. 29th Edition-Full Book. [S.I.]: Industrial Press, 2012.

REZENDE, E. D. **Elaboração de procedimento técnicos para análise de viabilidade de reaproveitamento de metal patente (Sn-Sb-Cu) para fabricação de mancais de deslizamento para os navios da marinha do Brasil**. Dissertação (B.S. thesis) – Centro universitário de Volta Redonda, 2019.

SALAMONE, B. C.; STRANO, I. A. **Estudo da variação do atrito cinético em mancais de deslizamento devido à contaminação do fluido lubrificante por biodiesel**. Dissertação (B.S. thesis) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

SOUZA, T. A. **Mancais de deslizamento**: estudo de caso. Monografia (Trabalho de Graduação) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Guaratinguetá, 2017.

STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. Chapter 10. Corrosive and Oxidative Wear, p. 553–570, 2000.

STOETERAU, R. L. **Comportamento estático e dinâmico de luvas aerostáticas para guias lineares**. Florianópolis, SC, 1992.

VASSILAROS, M. G. **An Experimental Investigation of Babbitt Metal Bonding**. [S.l.], 1976.

VEIT, H. M. **Reciclagem de materiais metálicos**: Estanho. s/d. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/napead/projetos/reciclagem-materiais-metalicos/pag10.php>.

ZEREN, A.; FEYZULLAHOGLU, E.; ZEREN, M. **A study on tribological behaviour of tin- based bearing material in dry sliding**. Materials & design, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 318–323, 2007.